



Bruno Miguel Goulart Palma

Licenciatura em Ciências da Engenharia Mecânica

Modelação de Forças em Fresagem Helicoidal

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Jorge Pamies Teixeira, Professor Doutor,
FCT - UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda
Arguente: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado
Vogal: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março de 2013



Modelação de Forças em Fresagem Helicoidal
Bruno Palma

2013



Bruno Miguel Goulart Palma

Licenciatura em Ciências da Engenharia Mecânica

Modelação de Forças em Fresagem Helicoidal

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Jorge Pamies Teixeira, Professor Doutor,
FCT - UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda
Arguente: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado
Vogal: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março de 2013

Copyright

Modelação de Forças em Fresagem Helicoidal

Copyright © 2013

Bruno Miguel Goulart Palma, FCT/UNL e UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*“Livre não sou, que nem a própria vida
Mo consente.
Mas a minha aguerrida
Teimosia
É quebrar dia a dia
Um grilhão da corrente.”*

Miguel Torga, in “Cântico do Homem”

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que durante esta caminhada estiveram presentes e puderam contribuir com o seu variado conhecimento e apoio na minha formação.

Em especial quero agradecer aos meus pais, pela dedicação que sempre demonstraram durante toda a minha formação universitária, à minha irmã, pela força e apoio que sempre demonstrou e à minha avó, pela sua forma de encarar a vida e por ter sido uma das pessoas mais sábias que conheci.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador, Professor Doutor Jorge Pamies Teixeira, pelo entusiasmo e disponibilidade que sempre demonstrou por esta dissertação, à Professora Doutora Carla Machado, pela ajuda e disponibilidade durante o trabalho experimental, e ao Sr. António Guinapo Campos e Sr. Paulo Magalhães, pela ajuda na parte experimental desta dissertação

Agradeço também os meus colegas e amigos, André Praça e António Figueiredo, pela ajuda durante a realização desta dissertação e à Sara Pires pela ajuda prestada na revisão da mesma.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Resumo

O processo de corte de fresagem helicoidal é um dos processos mais utilizados na indústria a nível mundial, exigindo o seu constante estudo e desenvolvimento, motivados pela necessidade de otimizar o processo de corte de acordo com a escolha dos parâmetros utilizados.

A criação de modelos matemáticos tem sido tema de vários estudos apresentados por diversos investigadores que, por um lado, procuram compreender os aspetos físicos implícitos no processo e, por outro lado, relacioná-los com os parâmetros de corte com o objetivo de otimizar todo o processo. A divulgação destes estudos tem permitido o avanço tecnológico nos processos de corte, o que levou à continuidade da investigação nesta área.

Nesta dissertação é apresentado um modelo matemático para a simulação das forças de corte utilizando o processo de fresagem helicoidal com fresas frontais de geometria cilíndrica e com raio de ponta. Com a modelação apresentada é possível obter-se a geometria da aresta de corte, a posição de um ponto genérico situado na aresta de corte e a espessura instantânea de corte da apara. Variáveis estas, utilizadas na simulação dos incrementos das forças axiais, radiais e tangenciais presentes na fresagem helicoidal. A identificação dos coeficientes de corte para o Aço Ck45 foi realizada recorrendo a estudos anteriores e para o alumínio Al7075-T651 através de trabalho experimental.

A justificação do modelo analítico foi realizada através de uma metodologia experimental recorrendo a um centro de maquinagem CNC para efetuar os ensaios de corte no Aço Ck45 e no alumínio Al7075-T651. Para a aquisição de dados e tratamento dos mesmos, utilizaram-se os programas LabVIEW e MATLAB, respetivamente.

Devido aos coeficientes de corte considerados, os valores das forças apresentam diferenças. No entanto, a modelação apresenta semelhanças físicas, no que diz respeito à forma das curvas das forças de corte, comprovando a veracidade do modelo.

Termos-chave:

Modelação, fresagem helicoidal, forças de corte, coeficientes de corte, fresa cilíndrica, fresa hemisférica.

Abstract

The helical milling is one of the most used cutting processes in the industry around the world, which motivates the scientific studies and developments to optimize the cutting processes according with cutting parameters.

A variety of mathematical models have been presented by several studies from different researchers, first seek to understand the physical aspects implicit in the process and, on the other hand, relate them to the cutting parameters in order to optimize the whole process. The disclosure of these studies has allowed technological advances in cutting processes, which led to continued research in this area.

In this dissertation is shown a mathematical model, which makes the simulation of the cutting forces in helical milling with cylindrical end mills and ball end mills. This modulation allows obtaining the geometry of the cutting edge, the position of a generic point situated on the cutting edge and the instantaneous chip thickness, variables used in the simulation of the axial, radial and tangential increment forces, acting in helical milling. The cutting coefficients identification for Ck45 steel was done using the previous studies, and for Al7075-T651 aluminium, with experimental work.

The analytical model justification was performed by experimental work using a CNC to do tests in Ck45 steel and aluminum Al7075-T651. For acquisition and processing data were used LabVIEW and MATLAB programs.

Due to the cutting coefficients used, the values of the cutting forces are different. However, the modeling shows physical similarities regarding the shape form of shear forces, which proves the accuracy of the model.

Key terms:

Modelling, helical milling, cutting forces, cutting coefficients, end mill, ball end mill.

Índice de Matérias

	Pág.
Agradecimentos	III
Resumo.....	V
Abstract.....	VII
Índice de Matérias.....	IX
Índice de Figuras	XI
Índice de Tabelas.....	XV
Simbologia e notações	XVII
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1.Motivação e objetivos	2
1.2.Organização e Estrutura.....	3
Capítulo 2 – Estado da Arte	5
Capítulo 3 – Modelação analítica de fresagem frontal com fresas cilíndricas e hemisféricas de dentes helicoidais	11
3.1.Geometria da ferramenta.....	13
3.1.1.Fresa cilíndrica frontal com dentes helicoidais	17
3.1.2.Fresa hemisférica frontal com dentes helicoidais	18
3.2.Coefficientes de Corte	20
3.3.Modelação das Forças de Corte.....	25
3.5.Resultados	29
3.5.1.Aço Ck45	29
3.5.2.Alumínio 7075 – T651	32
Capítulo 4 – Verificação experimental	37
4.1.Metodologia Experimental	38
4.1.1.Preparação de material	38
4.1.2. Instrumentos utilizados.....	39
4.1.3.Aquisição de dados	41

4.1.4.Ensaio de corte.....	43
4.1.5.Tratamento de dados	46
4.2.Resultados experimentais	46
4.2.1. Aço Ck45	46
4.2.2. Alumínio 7075 – T651	51
Capítulo 5 – Discussão de resultados.....	55
5.1. Fresas cilíndricas	55
5.1.1.Aço Ck45	55
5.1.2.Alumínio Al7075 – T651	61
5.2.Fresas Hemisféricas	64
Capítulo 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros	67
Bibliografia.....	70
Anexos	72
Anexo 1 – ModelaçãoFresagemHelicoidal.m	72
Anexo 2 – Tratadados.m	75
Anexo 3 – filtro.m	75
Anexo 4 – Main_ModelaçãoFresagemHelicoidal.m	75

Índice de Figuras

	Pág.
Figura 2.1 – Tipos de fresagem [3] a) periférica, b) frontal (facejamento), c) topo/frontal com fresa de topo.	6
Figura 2.2 – Fresagem periférica, [2]: (a) discordante, (b) concordante.....	6
Figura 3.1 – Tipos e fresas frontais [23].....	11
Figura 3.2 – Várias operações possíveis do processo de fresagem [24].	12
Figura 3.3 – Secção de corte onde se pode observar a espessura variável da apara, h , adaptado de [13].	12
Figura 3.4 – Fresa helicoidal frontal cilíndrica. [13].....	13
Figura 3.5 – Geometrias de vários tipos de fresas frontais, adaptado de [13].	14
Figura 3.6 – Geometria geral da fresa frontal, adaptado de [13].	15
Figura 3.7 – Geometria da aresta de corte, adaptado de [13].	15
Figura 3.8 – Dente helicoidal na fresa frontal hemisférica, adaptado de [13].....	19
Figura 3.9 – Gráfico das regressões lineares das Forças de Corte (F_c) e de Avanço (F_a).	24
Figura 3.10 – Movimentos de corte: (a) Movimentos de avanço e rotação da ferramenta; (b) Geometria da fresagem, ângulos de entrada, saída e de imersão [12].	26
Figura 3.11 – Algoritmo da simulação das forças de corte.	27
Figura 3.12 – Forças incrementais na fresa frontal helicoidal [12].	29
Figura 3.13 – Modelação das forças de corte teóricas para Ck45, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.....	30
Figura 3.14 – Modelação das forças de corte teóricas para Ck45, fresa cilíndrica de três dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.	30
Figura 3.15 – Modelação das forças de corte teóricas para Ck45, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.	31
Figura 3.16 – Modelação das forças de corte teóricas para Ck45, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=180^\circ$, 600 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,02$ mm.	31
Figura 3.17 – Modelação das forças de corte teóricas para Ck45, fresa hemisférica de três dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0$, $\phi_{ex}=53^\circ$, 600 rpm, $p=6$ mm e $a_d=0,02$ mm.....	32
Figura 3.18 – Modelação das forças de corte teóricas para o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=30^\circ$, 3000 rpm, $p=2$ mm e $a_d=0,07$ mm.	33

Figura 3.19 – Modelação das forças de corte teóricas para o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5$ mm e $a_d=0,05$ mm.	33
Figura 3.20 – Modelação das forças de corte teóricas para o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=120^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5$ mm e $a_d=0,05$ mm.	34
Figura 3.21 – Modelação das forças de corte teóricas para o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=180^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5$ mm e $a_d=0,05$ mm.	34
Figura 3.22 – Modelação das forças de corte teóricas para o Al7075, fresa hemisférica de dois dentes, $D=10$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=30^\circ$, 3000 rpm, $p=6$ mm e $a_d=0,05$ mm.	35
Figura 4.1 - Centro de Maquinagem do Laboratório de Tecnologia Mecânica do DEMI.....	37
Figura 4.2 – Dimensões dos blocos de ensaio.	38
Figura 4.3 – Operação de maquinagem de facejamento [24].....	38
Figura 4.4 – Bloco de ensaio de Alumínio.	39
Figura 4.5 – Ilustração da montagem da célula de carga na mesa de trabalho do centro de maquinagem.	39
Figura 4.6 – Montagem experimental com bloco de Necuron.	40
Figura 4.7 – (a) Processador de dados; (b) Amplificador.	41
Figura 4.8 – Estrutura do programa de aquisição de dados em LabVIEW.	42
Figura 4.9 – Painel principal do programa de aquisição de dados.	43
Figura 4.10 – Configuração dos ensaios de corte	44
Figura 4.11 – Processos de corte: (a) Fresagem de topo do aço; (b) Facejamento do aço.	45
Figura 4.12 – Fresagem de topo com fresa hemisférica do alumínio.....	45
Figura 4.13 – Resultados do ensaio de corte com o Aço Ck45, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.....	47
Figura 4.14 – Resultados do ensaio de corte com o Aço Ck45, fresa cilíndrica de três dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.....	47
Figura 4.15 – Resultados do ensaio de corte com o Aço Ck45, fresa cilíndrica de quatro dentes, $D=16$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.....	48
Figura 4.16 – Resultados do ensaio de corte com o Aço Ck45, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.....	48
Figura 4.17 – Resultados do ensaio de corte com o Aço Ck45, fresa cilíndrica de três dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.....	49

Figura 4.18 – Resultados do ensaio de corte com o Aço CK45, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=180^\circ$, 600 rpm, $p=1,5\text{ mm}$ e $a_d=0,02\text{ mm}$	50
Figura 4.19 – Resultados do ensaio de corte com o Aço Ck45, fresa hemisférica de três dentes, $D=10\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=53^\circ$, 600 rpm, $p=6\text{ mm}$ e $a_d=0,02\text{ mm}$	50
Figura 4.20 – Resultados do ensaio de corte com o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=30^\circ$, 3000 rpm, $p=2\text{ mm}$ e $a_d=0,07\text{ mm}$	51
Figura 4.21 – Resultados do ensaio de corte com o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5\text{ mm}$ e $a_d=0,05\text{ mm}$	51
Figura 4.22 – Resultados do ensaio de corte com o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=120^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5\text{ mm}$ e $a_d=0,05\text{ mm}$	52
Figura 4.23 – Resultados do ensaio de corte com o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=180^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5\text{ mm}$ e $a_d=0,05\text{ mm}$	53
Figura 4.24 – Resultados do ensaio de corte com o Al7075, fresa hemisférica de dois dentes, $D=10\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=30^\circ$, 3000 rpm, $p=6\text{ mm}$ e $a_d=0,05\text{ mm}$	53
Figura 5.1 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5\text{ mm}$ e $a_d=0,03\text{ mm}$	56
Figura 5.2 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de três dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5\text{ mm}$ e $a_d=0,03\text{ mm}$	56
Figura 5.3 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de três dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 600 rpm, $p=2\text{ mm}$ e $a_d=0,02\text{ mm}$	57
Figura 5.4 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de quatro dentes, $D=16\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5\text{ mm}$ e $a_d=0,03\text{ mm}$	58
Figura 5.5 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 800 rpm, $p=1,5\text{ mm}$ e $a_d=0,03\text{ mm}$	59
Figura 5.6 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de três dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 800 rpm, $p=1,5\text{ mm}$ e $a_d=0,03\text{ mm}$	60
Figura 5.7 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=180^\circ$, 600 rpm, $p=1,5\text{ mm}$ e $a_d=0,02\text{ mm}$	60
Figura 5.8 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=30^\circ$, 3000 rpm, $p=2\text{ mm}$ e $a_d=0,07\text{ mm}$	62
Figura 5.9 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5\text{ mm}$ e $a_d=0,05\text{ mm}$	62
Figura 5.10 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=120^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5\text{ mm}$ e $a_d=0,05\text{ mm}$	63

Figura 5.11 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=180^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5\text{ mm}$ e $a_d=0,05\text{ mm}$	64
Figura 5.12 – Resultados teóricos e experimentais do corte no aço com fresa hemisférica de três dentes, $D=12\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=53^\circ$, 600 rpm, $p=5\text{ mm}$ e $a_d=0,02\text{ mm}$	65
Figura 5.13 – Resultados teóricos e experimentais do corte no alumínio com fresa hemisférica de dois dentes, $D=10\text{ mm}$, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=30^\circ$, 3000 rpm, $p=6\text{ mm}$ e $a_d=0,05\text{ mm}$	65

Índice de Tabelas

	Pág.
Tabela 3.1 – Condições de corte para os testes de fresagem [6].	21
Tabela 3.2 – Valores lineares dos coeficientes específicos de corte do Aço CK45 para $\gamma=6^\circ$ e $v_c=100$ m/min [6].	22
Tabela 3.3 – Variáveis de corte para os ensaios de corte ortogonal do alumínio 7075.	22
Tabela 3.4 – Medição das espessuras de aparas após o corte ortogonal do alumínio Al7075 e valores dos parâmetros de maquinagem.....	23
Tabela 3.5 – Valores lineares dos coeficientes específicos de corte do Alumínio Al7075-T651.	24
Tabela 4.1 - Características das fresas utilizadas no processo experimental [24].	40

Simbologia e notações

a – Altura de nariz da fresa

a_d – Avanço por dente

b – Largura de corte

c – Constante de amortecimento

D – Diâmetro da ferramenta

db – Projeção do comprimento infinitesimal do dente de corte, segundo a direção da velocidade de corte

dz – Incremento axial

e – Profundidade axial de corte

F_a – Força de avanço

F_c – Força de corte

f_a – Taxa de avanço

dF_a, dF_r, dF_t – Forças de corte diferenciais

$d\phi$ – Incremento angular

k – Constante de elasticidade

k_{ac}, k_{rc} e k_{tc} – Coeficientes de corte axial, radial e tangencial

k_{ae}, k_{re} e k_{te} – Coeficientes de atrito associados à aresta de corte, axial, radial e tangencial

k_s – Energia específica de corte

h – Espessura da apara antes do corte; Altura do nariz da fresa frontal

h_c – Espessura da apara antes do corte

j – Dente da fresa

M_r, N_r – Distâncias radiais do perfil da fresa frontal

M_z, N_z – Distâncias axiais do perfil da fresa frontal

NZ – Número total de dentes da fresa.

N – Velocidade angular

N_{volt} – Número de voltas da ferramenta

$N_{\phi p}$ – Número de passos para a integração angular

N_z – Número de passos para a integração em altura

t – Tempo em segundos

p – Profundidade de corte

R – Raio de curvatura do nariz da fresa frontal

$r(z)$ – Distância radial de um ponto genérico de corte a uma altura z

$\vec{r}(z)$ – Vetor posição de um ponto genérico de corte

R_r – Distância radial entre o centro de curvatura do nariz da fresa e o eixo da fresa

R_z – Distância axial entre o centro de curvatura do nariz da fresa e a base da fresa

V_a – Velocidade de avanço

X, Y, Z – Coordenadas do referencial cartesiano

$Z(z)$ – Posição axial do ponto genérico P situado na aresta de corte

z – Profundidade de corte axial; Elevação Axial de um ponto genérico na aresta de corte.

A_f – Ângulo paramétrico da base da fresa frontal

β – Ângulo de hélice da ferramenta

β_f – Ângulo paramétrico lateral da fresa frontal

χ – Ângulo de posição da ferramenta

$\kappa(z)$ – Ângulo de imersão axial de um ponto genérico de corte

γ – Ângulo de ataque de uma ferramenta

τ_s – Tensão de corte de um material

ϕ – Ângulo de imersão da fresa; Ângulo de corte

ϕ_{ex} – Ângulo de saída do dente da ferramenta

ϕ_p – Passo angular entre dentes

ϕ_{st} – Ângulo de entrada do dente da ferramenta

ψ – Ângulo de atraso de entrada do dente seguinte da ferramenta

$\psi_{2s}, \psi_{ae}, \psi_{as}$ – Ângulos de posição na aresta de corte, na zona *MN*

$\psi(z)$ – Ângulo radial de atraso de um ponto genérico de corte; Ângulo de posição na aresta de corte à altura *z*

ω_f – Frequência de amostragem

Acrónimos e Siglas

CAD – *Computer Assisted Design*

CAM – *Computer Assisted Machining*

CNC – *Computer Numerically Controlled*

DEMI – Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

LabVIEW – *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*

MATLAB – *Matrix Laboratory*

NI – *National Instruments*

Capítulo 1

Introdução

A fresagem é um processo de subtração de material de peças prismáticas ou cilíndricas. Várias peças obtidas através deste processo são utilizadas nas indústrias aeronáutica, automóvel, naval, aeroespacial, caminho-de-ferro, equipamento médico, geração elétrica, componentes eletrónicos e componentes de plástico. A importância deste processo é reconhecida, tanto a nível industrial, como a nível económico, pela sua versatilidade em gerar geometrias complexas com elevado grau de qualidade.

O aparecimento de peças prismáticas mais complexas, com menores intervalos de tolerância e acabamentos mais finos, obrigou ao avanço tecnológico nesta área de forma a cumprir as especificações exigidas.

O processo de fresagem tem como vantagens o facto de se obter elevada precisão de corte com pequenas forças de corte axiais sendo, por isso, um dos processos de corte mais utilizados a nível da fabricação de peças em alumínio de grandes dimensões para a indústria aeronáutica[1].

Devido aos avanços tecnológicos nesta área e à crescente utilização do processo de fresagem, surgiram também vários problemas agregados à inovação. Um dos problemas prende-se com a escolha dos parâmetros de corte que otimizem o processo de maquinagem de peças. O conhecimento das forças de corte associadas a cada maquinagem, e respetivos parâmetros operacionais, permite a escolha das ferramentas adequadas ao material a maquinar. De acordo com estes dados, é possível obter resultados do processo de corte com melhor qualidade e menor custo. Permite-se assim que a fresagem seja um processo competitivo em relação a outros processos utilizados para a fabricação de peças mecânicas.

A seleção dos parâmetros de maquinagem não é um processo analítico, sendo necessário por vezes, recorrer à experimentação. Desta forma, a criação de modelos que simulem a realidade, facilitam a tomada de decisões e escolha das ferramentas, permitindo a redução de tempos de preparação, através da simulação das forças de corte e da potência consumida durante a operação. Possibilita, também, fazer uma análise de estabilidade da ferramenta e a análise de tensões.

1.1.Motivação e objetivos

A versatilidade da fresagem é, como já foi referido, uma mais-valia para este processo de corte, fazendo deste, um dos mais usados nas indústrias a nível mundial. A resposta ao fabrico de peças, que assumem critérios de fabrico cada vez mais exigentes e utilizam materiais mais difíceis de maquinar, tem ditado um constante avanço nas práticas de maquinagem.

A fresagem helicoidal é um processo de ampla utilização pelo que o seu estudo e compreensão têm como objetivo aumentar o conhecimento de utilização deste processo, tornando-o mais eficaz.

Por outro lado, a antecipação dos possíveis cenários que possam acontecer durante a maquinagem, permite uma melhor preparação da mesma a nível da segurança, de escolha de ferramentas e a nível económico

A motivação desta dissertação será a de criar instrumentos de análise que possam ir de encontro à necessidade de prever os parâmetros operacionais deste processo, nomeadamente, elaborando um modelo analítico que possa simular as forças de corte que são originadas. Assim, é possível escolher os parâmetros de maquinagem que mais se adequam a cada situação, e melhorem a eficiência do processo.

O objetivo deste estudo é o desenvolvimento de um modelo analítico para a determinação das forças de corte produzidas por fresas helicoidais, com ou sem raio de ponta, tendo em conta os seus parâmetros operacionais, o material a maquinar e a geometria da ferramenta.

No sentido de dar uma constância e maior universalidade ao respetivo modelo, será efetuada uma validação experimental.

1.2. Organização e Estrutura

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos. No capítulo 1 faz-se uma breve descrição do problema e da sua relevância no contexto atual. É também referida a motivação para a elaboração desta dissertação. Por último, é estruturado o modelo de organização da mesma.

No capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica, enunciando os autores que contribuíram para o desenvolvimento do tema nos últimos anos.

No capítulo 3 é feita a modelação analítica e são explicados os fundamentos físicos e matemáticos do modelo. São definidas as geometrias típicas das ferramentas em análise, que serão utilizadas no modelo, são definidos os coeficientes de corte dos materiais utilizados na parte experimental, é apresentada a modelação proposta e, por fim, são apresentados os resultados.

No capítulo 4 é feita a verificação experimental do modelo. Primeiro é enunciada a metodologia adotada durante a parte experimental desta dissertação, onde se faz referência aos materiais e equipamentos utilizados. Os resultados experimentais são apresentados no final deste capítulo.

O capítulo 5 é o capítulo da discussão de resultados, onde são confrontados os valores obtidos através do modelo analítico e da experimentação. É feita uma análise de ambos, referindo os valores que eram esperados e explicando-se fisicamente os valores obtidos. São apresentadas conclusões acerca do modelo onde se explica a fiabilidade do mesmo e é feita uma análise crítica do decorrer da dissertação.

No último capítulo, o capítulo 6, é feita uma breve conclusão e é sugerido trabalho futuro dando continuidade ao estudo elaborado nesta dissertação.

Capítulo 2

Estado da Arte

A fabricação de peças através de processos tecnológicos é em geral referenciada como uma alteração de forma de um dado material. Os processos de alteração estão divididos em quatro grupos, classificados de acordo com a sua natureza [2]. As tecnologias de corte, como a maquinagem, têm como objetivo a remoção de excesso de material compreendido entre a forma final da peça e o material em bruto.

Tal como todos os processos de maquinagem, a fresagem baseia-se na combinação de dois movimentos: o de rotação da fresa (ferramenta), designado por movimento de corte e o movimento relativo entre a peça e a ferramenta, designado por movimento de avanço. Os dois tipos mais comuns de fresagem são a frontal e a de topo que, consoante os sentidos dos movimentos, podem ser concordantes ou discordantes. A Figura 2.1 e Figura 2.2, demonstram as diferenças entre os vários tipos de fresagem.

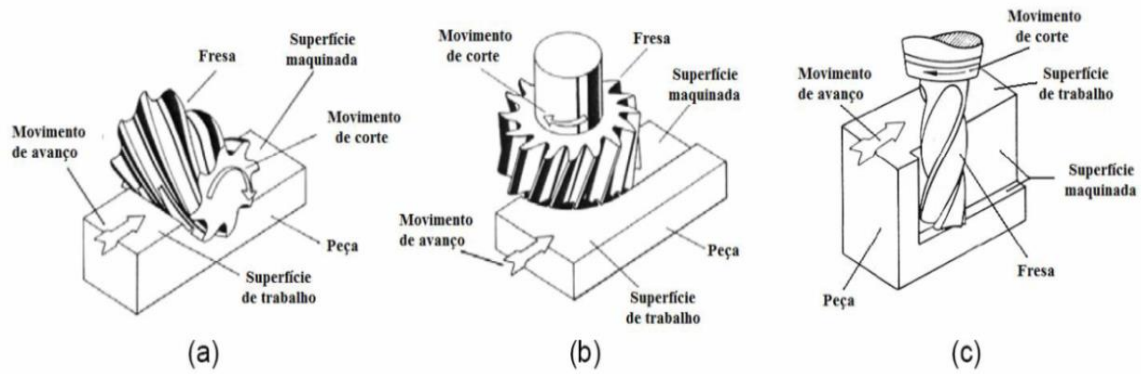


Figura 2.1 – Tipos de fresagem [3] a) periférica, b) frontal (facejamento), c) topo/frontal com fresa de topo.

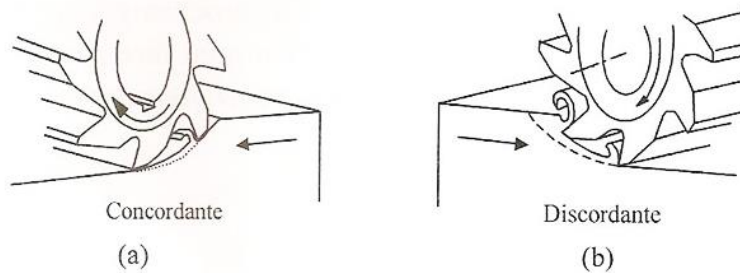


Figura 2.2 – Fresagem periférica, [2]: (a) discordante, (b) concordante.

Na fresagem de topo (processo usualmente denominado por facejamento) gera-se uma superfície perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta. A fresagem frontal gera uma superfície paralela ao eixo de rotação da ferramenta e, nos casos em que se pretende obter um degrau na peça maquinada, é gerada também uma pequena superfície perpendicular ao eixo da ferramenta. Nesta situação, várias geometrias podem ser obtidas tendo em conta a fresa escolhida, fresa cilíndrica sem raio de ponta, com raio de ponta, hemisférica, entre outras. Podem-se obter várias geometrias de forma económica e eficaz.

O conhecimento das forças de corte associadas à maquinagem permite tomar medidas para melhorar a qualidade final da peça, bem como a sua precisão. Para isso, é necessário simular de forma fiável as forças de corte, podendo-se estimar a potência necessária a empregar no corte, estimar o binário de corte, estudar as vibrações decorrentes da maquinagem e analisar a qualidade e precisão da peça maquinada [4,5].

Devido à complexidade dos fenómenos de corte de metais, o estudo dos seus fundamentos físicos tem permitido o desenvolvimento de modelos com resultados das forças de corte cada vez mais aproximados da realidade.

Os primeiros estudos que referem em simultâneo a fresagem com dentes retos e dentes de geometria helicoidal, foram elaborados por Sawin e Salomon [6] em 1926, pretendendo relacionar as forças de corte diretamente com as geometrias das aparas. Estes dois investigadores defendiam que as constantes de corte estão diretamente relacionadas com espessura da apara.

Em 1937, Klien [7] desenvolveu equações que permitiam calcular as forças tangenciais em fresas com dentes retos, usando as séries de Fourier. Schmitz e Mann [8], baseando-se nas equações de Fourier, tentaram desenvolver um modelo que incluísse o efeito do ângulo da hélice, dividindo a ferramenta em pequenas porções axiais onde, a cada instante, se calculavam as forças para serem somadas posteriormente. Foi também desenvolvido por Mann, um modelo tridimensional de estimação de forças de corte com base nas séries de Fourier. Começou-se então, a desenvolver a ideia de que os coeficientes de corte estariam dependentes do material a maquinar.

Martelloti [6] entre 1941 e 1945, focou o seu estudo na cinemática da fresagem, desenvolvendo expressões que permitiam calcular a espessura de apara real, concluindo que a potência despendida na fresagem concordante aparentava ser maior do que na discordante.

Também em 1945 Merchant e Brown [9], apresentaram a modelação para o corte ortogonal e oblíquo, que é utilizada até aos dias de hoje. Juntamente com Piispanen [10] desenvolveram o conceito de ângulo de corte, ângulo de ataque e ângulo de saída da ferramenta.

Altintas e Lee [11] apresentaram em 1996 um modelo fenomenológico (mecânico) para a fresagem helicoidal, utilizando os conceitos de ângulo de ataque e de saída da ferramenta, recorrendo a bases de dados de corte ortogonal para o cálculo das constantes de corte. Altintas [12] apresentou também em 2000, um código que permitia simular as forças de corte na fresagem helicoidal, baseando-se nos conceitos do corte ortogonal e, um ano mais tarde, juntamente com Engin [13], modelaram matematicamente expressões que permitiram descrever a geometria dos vários tipos de fresas, permitindo também calcular as forças de corte. Desde então foram surgindo várias alterações e novos modelos matemáticos [1,14–16].

Bhattacharyya [8] em 2010, juntamente com um grupo de investigadores, desenvolveram um novo modelo para obter as forças de corte baseado na largura da apara instantânea. Trata-se de uma nova abordagem, uma vez que na fresagem helicoidal a largura da apara varia de acordo com o avanço do dente. Os autores desta investigação defenderam a tese de que as forças de corte também variam de acordo com a largura da apara, sendo inferiores para larguras menores.

Diversos estudos têm sido apresentados por vários investigadores, para o mecanismo de formação das aparas de corte. É demonstrado por alguns cientistas que a instabilidade na formação de apara pode ser consequência das características do material, condições de corte,

atrito e da resposta da ferramenta. W.Konin [17] defendeu que a apara é formada pelo arranque e plastificação da mesma, seguidos de altas tensões de compressão.

Rivière-Lorphèvre e Filippi [18] estudaram o facto da excentricidade da ferramenta poder provocar alterações no sinal de medição das forças de corte durante a maquinagem desenvolvendo, assim, um modelo simplificado que teve em conta esta alteração de sinal. Um estudo semelhante foi também desenvolvido por X. Li e H. Li [14].

A implementação destas metodologias implicou o desenvolvimento da investigação a nível da obtenção e simulação das constantes de corte implícitas no modelo. Foram realizados nesta área vários avanços científicos com o intuito de melhor se compreender os fundamentos físicos destas constantes. Um deles foi desenvolvido por Gonzalo, Beristain, Jauregi e Sanz [5], apresentando uma metodologia para identificar estas constantes. Gradisek, Kalveramb e Weinert [4], também desenvolveram pesquisa nesta área.

O desenvolvimento de metodologias que pudessem simular as forças de corte desencadeou a possibilidade de se realizarem outros estudos a nível estrutural e dinâmico, tanto das peças maquinadas como das próprias ferramentas, sendo assim possível identificar possíveis danos estruturais. Budak [15] desenvolveu estudos sobre as deformações estruturais causadas na ferramenta e na peça durante a maquinagem e Zaghbani e Songmene [19] sobre as vibrações da ferramenta durante a maquinagem.

A fresagem helicoidal é um processo em crescente desenvolvimento e utilização, onde o estudo científico tem tido um carácter importante. Este processo apresenta como vantagens a menor força de corte a aplicar, devido ao facto do dente se desenrolar em hélice e, a elevada precisão deste processo [1].

A nível científico foram realizadas três abordagens com o intuito de obter um maior conhecimento acerca deste processo. Numa primeira abordagem, desenvolveram-se modelos analíticos que procuraram matematicamente relacionar as forças de corte com os aspetos mecânicos, como o atrito, a geometria da ferramenta e as características do material. São uma réplica dos modelos de corte ortogonal e oblíquo, apresentados por Merchant e Armarendo [5,20].

Uma segunda abordagem defende que a criação de modelos analíticos para estudar o processo de maquinagem tem custos elevados e um gasto de tempo excessivo. Como alternativa, é proposta a criação de modelos numéricos utilizando técnicas como o Método dos Elementos Finitos [20,21]. No entanto, os vários parâmetros a ter em conta no processo de maquinagem têm levado a uma investigação contínua até à data. Existem já vários modelos numéricos que simulam as operações de maquinagem.

A terceira abordagem baseia-se em métodos mecânicos [13,22] que utilizam séries de relações entre as variáveis mecânicas e as forças de corte, assumindo que as forças de corte são proporcionais à área da secção de corte da apara antes do corte.

Conclui-se que a simulação de processos de corte que possibilitem prever a realidade, é de extrema importância nos tempos modernos e tem sido tema de vários estudos desenvolvidos por inúmeros cientistas.

Capítulo 3

Modelação analítica de fresagem frontal com fresas cilíndricas e hemisféricas de dentes helicoidais

Tal como foi referido anteriormente, a fresagem é um processo de corte intermitente. A ferramenta de corte (fresa) ilustrada na Figura 3.1 pode ter um ou mais dentes. A fresa é fixa a uma árvore que recebe potência do motor e transmite movimento de rotação à ferramenta. A peça é fixa à mesa da fresadora ou do centro de maquinagem, CNC.



Figura 3.1 – Tipos e fresas frontais [23]

A combinação dos movimentos de rotação da fresa, avanço, com os movimentos de translação da mesa possibilita obter várias geometrias com esta operação como se observa na Figura 3.2.

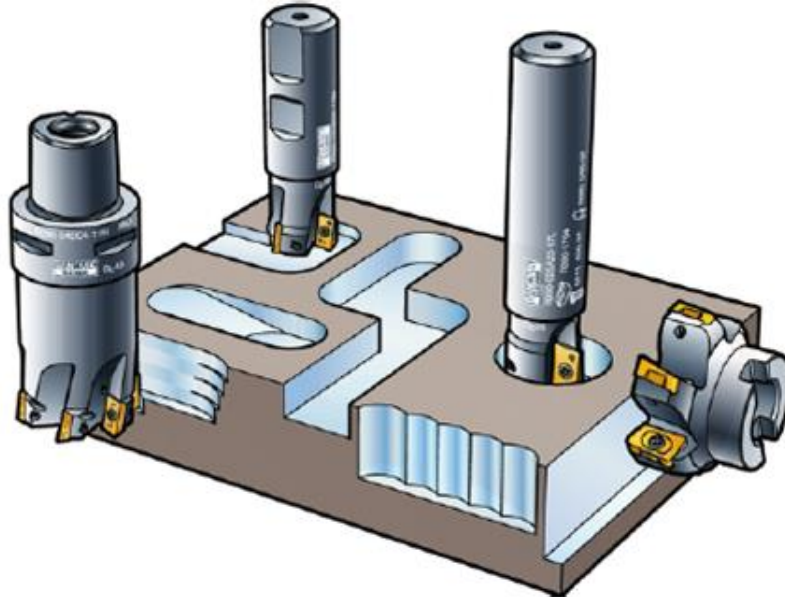


Figura 3.2 – Várias operações possíveis do processo de fresagem [24].

Por ser uma operação intermitente, cada dente traça uma linha de corte originando várias aparas a cada passagem de cada dente. As aparas, idênticas entre si, apresentam espessura variável como é ilustrado na Figura 3.3

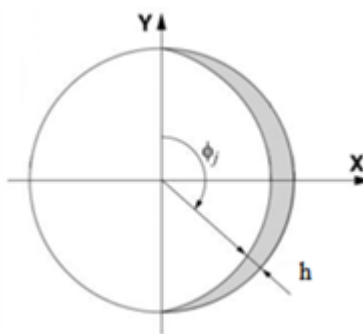


Figura 3.3 – Secção de corte onde se pode observar a espessura variável da avara, h , adaptado de [13].

Os estudos mais recentes acerca da fresagem de frontal com dentes helicoidais abordaram os aspetos físicos e mecânicos desta operação. Estes estudos tiveram como objetivo modelar

analiticamente as forças de corte associadas a este tipo de operação. No entanto, ainda não foi estabelecido um modelo analítico definitivo para as forças de corte [1].

Devido ao facto da fresagem ser um processo de corte intermitente, este origina forças periódicas que induzem vários fenómenos mais ou menos destrutivos para a ferramenta, designadamente relativas ao seu comportamento dinâmico. As ferramentas helicoidais atenuam estes efeitos ao produzirem cortes mais progressivos.

3.1.Geometria da ferramenta

Na presente dissertação, o estudo focou-se nas fresas de frontais cilíndricas e hemisféricas. Esta decisão deveu-se a vários motivos, entre os quais os económicos e pelo facto de haver alguma dificuldade de se encontrarem outras geometrias de fresas disponíveis no mercado.

Para a caracterização de uma fresa helicoidal torna-se necessário para cada uma das características geométricas das mesmas, saber o seu posicionamento relativo à peça. Para tal, considera-se o ângulo de imersão, ϕ , definido pelo ângulo formado entre o ponto em que o dente entra em contacto com a peça e o ponto em que este deixa de estar em contacto com a peça, tendo como centro o eixo da ferramenta.

Os dentes das fresas helicoidais desenvolvem-se segundo uma linha helicoidal que parte da base do nariz da fresa até à altura de corte da mesma. A Figura 3.4 ilustra uma fresa cilíndrica frontal com dentes helicoidais.

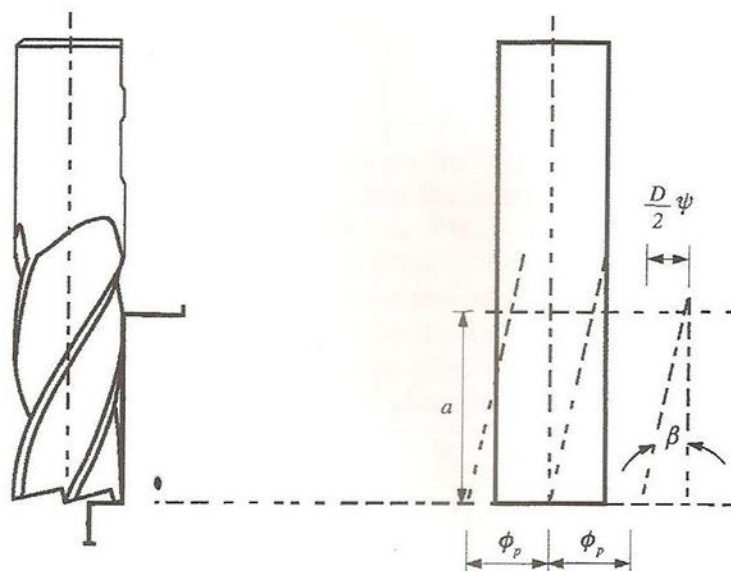


Figura 3.4 – Fresa helicoidal frontal cilíndrica. [13]

A hélice da ferramenta possibilita um carregamento de força gradual na apara ao longo da mesma. Como se pôde observar na figura anterior, β representa o ângulo de hélice da ferramenta, D representa o diâmetro da fresa e ϕ representa o ângulo de imersão. Devido à inclinação da hélice, a entrada do dente na peça é feita a diferentes alturas apresentando um atraso em relação ao ângulo de entrada do nariz da fresa (ψ). Este pode ser definido pela seguinte expressão,

$$\psi = \frac{2z \tan \beta}{D} \quad (3.1)$$

sendo z a profundidade de corte axial em cada instante.

Várias geometrias de fresas podem ser utilizadas nesta operação de corte, de acordo com o perfil final que se pretende obter. Parametrizando a ferramenta, consegue-se uma geometria geral podendo-se modelar os vários tipos de fresas. A Figura 3.5 mostra os vários tipos de fresas e a Figura 3.6, a geometria parametrizada.

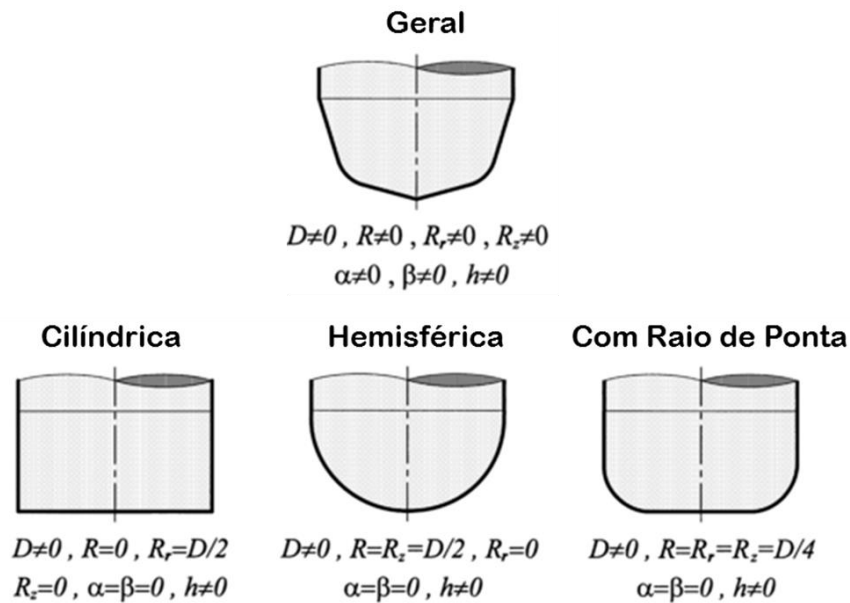


Figura 3.5 – Geometrias de vários tipos de fresas frontais, adaptado de [13].

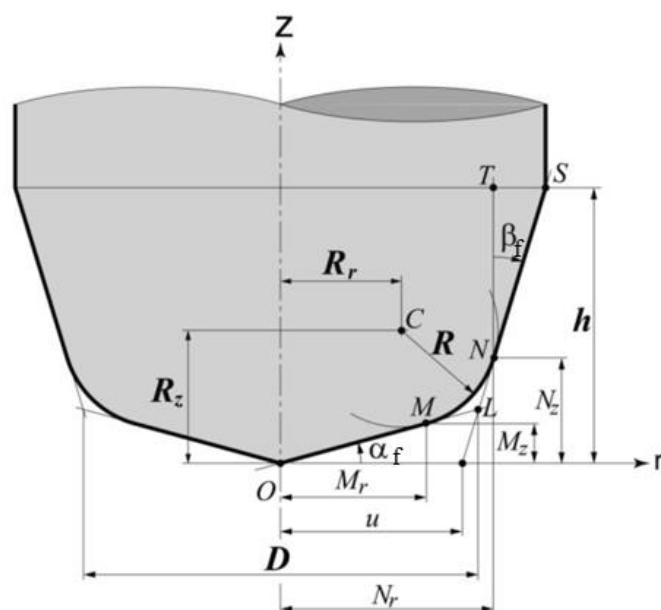


Figura 3.6 – Geometria geral da fresa frontal, adaptado de [13].

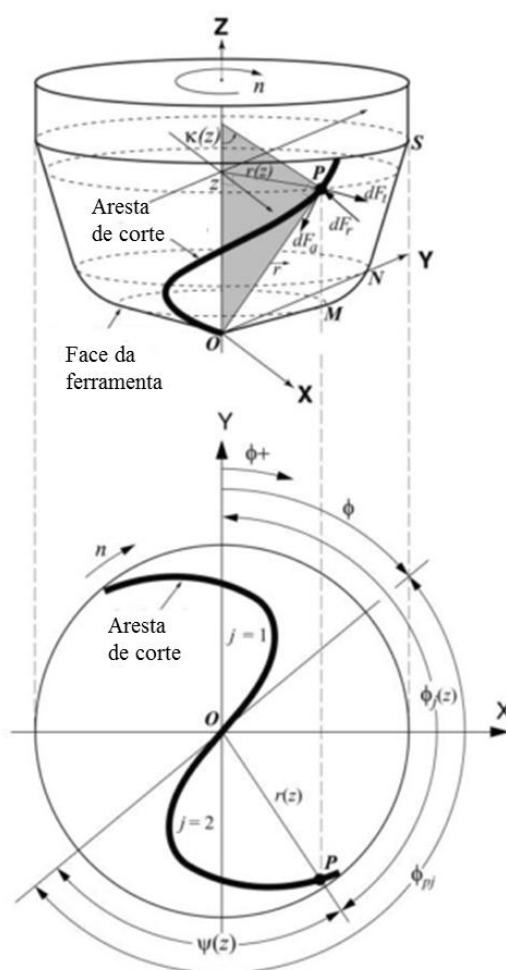


Figura 3.7 – Geometria da aresta de corte, adaptado de [13].

Considerando o sistema de eixos representado na Figura 3.6 (r representa o sentido radial e z o sentido axial), define-se a geometria da ferramenta de acordo com sete parâmetros geométricos [25], $D, R, R_r, R_z, \alpha_f, \beta_f, h$.

O dente helicoidal da fresa é desenvolvido em volta da face da ferramenta, desde a base até à altura de corte, como é mostrado na Figura 3.7.

Dado um ponto genérico P , a uma altura (ou posição axial) z e a uma distância radial no plano XY $r(z)$, para a definição da sua posição exata, tendo em conta que a progressão na aresta de corte se faz ao longo de uma hélice, torna-se necessário definir o ângulo de imersão axial $\kappa(z)$, compreendido entre o eixo da ferramenta e a normal à aresta de corte no ponto P . O ângulo de atraso radial $\psi(z)$ está definido entre a linha que liga o ponto P ao centro da ferramenta no plano XY e a linha tangente à aresta de corte no centro da ferramenta no plano XY (pode também ser definido como o ângulo de abertura do dente de corte). É possível, com estas coordenadas, definir o vetor posição do ponto P ($\vec{r}(z)$).

Para a análise das forças exercidas no ponto P , considera-se um elemento dz a uma altura z . Sobre o ponto P exercem-se três forças de corte diferenciais, dFa , dFr e dFt , correspondentes às direções axial, radial e tangencial, respetivamente.

Observa-se na Figura 3.6, que o nariz da ferramenta está dividido em três zonas, OM, MN e NS, definidas matematicamente pelos parâmetros geométricos da ferramenta. Verifica-se também que o nariz da ferramenta tem um raio variável. É necessário definir o raio de ponta da ferramenta para uma altura z ($r(z)$).

$$\begin{cases} r(z) = \frac{z(\psi)}{\tan \alpha_f}, & \kappa(z) = \alpha_f & \text{ZonaOM} \\ r(z) = R_r + \sqrt{R^2 - (R_z - z(\psi))^2}, & \kappa(z) = \sin^{-1}\left(\frac{r(z) - R_r}{R}\right) & \text{ZonaMN} \\ r(z) = N_r + (z(\psi) - N_z) \tan \beta_f, & \kappa(z) = \frac{\pi}{2} - \beta_f & \text{ZonaNS} \end{cases} \quad (3.2)$$

O arco do nariz da fresa que tem o centro no ponto C , distância radial R_r e raio R , é tangente à face lateral do nariz da fresa e à base da fresa. A intersecção com as linhas OL e LS é feita nos pontos M e N como é mostrado na Figura 3.6. As distâncias radiais e axiais entre os pontos e o eixo são:

$$\begin{cases} M_r = \frac{R_z \tan \alpha_f + R_r + \sqrt{(R^2 - R_r^2) \tan^2 \alpha_f + 2R_z R_r \tan \alpha_f - R_z^2 + R^2}}{\tan^2 \alpha_f + 1} \\ M_z = M_r \tan \alpha_f \end{cases} \quad 0^\circ \leq \alpha_f < 90^\circ \quad (3.3)$$

Definindo-se u como a distância entre o centro da ferramenta e o ponto de intersecção das linhas que definem a zona NS , calcula-se N_z e N_r pelas seguintes equações:

$$\begin{cases} N_z = \frac{(R_r - u) \tan \beta_f + R_z - \sqrt{(R^2 - R_z^2) \tan^2 \beta_f + 2R_z(R_r - u) \tan \beta_f - (R_r - u)^2 + R^2}}{\tan^2 \beta_f + 1} \\ N_r = u + N_z \tan \beta_f \end{cases} \quad \beta_f < 90^\circ \quad (3.4)$$

3.1.1. Fresa cilíndrica frontal com dentes helicoidais

A posição de cada um dos pontos genéricos P , ilustrados na Figura 3.7, ao longo do dente j é obtida recorrendo aos parâmetros geométricos da ferramenta já referidos, ângulo de imersão radial (ϕ_j) e ângulo de posição radial na aresta de corte ($\psi(z)$). O ângulo de imersão radial é definido como o ângulo de avanço do ponto P num determinado dente j no plano XY , desde o contacto do dente com o material a maquinar. A determinação deste ângulo será feita no subcapítulo 3.4.

Tendo em conta a geometria genérica apresentada na Figura 3.6, a fresa cilíndrica frontal obtêm-se fazendo α_f e β_f iguais a zero. As distâncias aos eixos da ferramenta das equações (3.3) e (3.4) passam a ser:

$$\begin{cases} M_r = \frac{D}{2} - R \\ M_z = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} N_r = \frac{D}{2} \\ N_z = R \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} R_r = \frac{D - 2R}{2} \\ R_z = R \end{cases} \quad (3.7)$$

sendo R o raio de curvatura do nariz da fresa. No caso das fresas frontais cilíndricas sem raio de ponta, este valor é zero, o que implica que R_z seja, também zero.

Observa-se, na Figura 3.6, que a aresta de corte da fresa cilíndrica frontal se situará sempre na zona NS , sendo a zona MN inexistente. Pela equação (3.2) deduz-se a distância do ponto P ao eixo da fresa. Esta distância é constante ao longo de z .

$$r(z) = N_r = \frac{D}{2} \quad (3.8)$$

Pelo mesmo facto, o ângulo de imersão axial $k(z)$ é constante, uma vez que o ângulo formado pela normal à aresta de corte no ponto P e o eixo da ferramenta é sempre um ângulo reto.

$$\kappa(z) = \frac{\pi}{2} \quad (3.9)$$

Para a zona compreendida entre os pontos OM (topo da fresa), considera-se que as forças de corte são nulas, pois estas não removem a peça e portanto a progressão das forças de corte é feita nas faces laterais da fresa.

Para definir totalmente a geometria da fresa, conseguindo-se obter as coordenadas de posição exatas de cada ponto pertencente à aresta de corte, é necessário obter-se o ângulo de posição na aresta de corte à altura z ($\psi(z)$) para um ponto genérico P . Tendo em conta que β_i é igual a zero,

$$\psi(z) = \frac{(z - N_z) \tan \beta}{N_r} - \psi_{2s} + \psi_{ae} \quad (3.10)$$

onde ψ_{2s} e ψ_{ae} são os ângulos finais de posição nos pontos M e N , respetivamente, na aresta de corte pertencente à zona MN . Estes dois ângulos são nulos, uma vez que na fresa cilíndrica a zona MN é inexistente. Na equação (3.10), β representa o ângulo de hélice da ferramenta, sendo possível reescrever a equação (3.10) da seguinte forma:

$$\psi(z_j) = \frac{2(z_j \tan \beta)}{D} \quad (3.11)$$

A equação (3.11) é bastante semelhante à equação (3.1), no entanto esta última tem em conta a cota z do ponto P e o dente j da fresa.

3.1.2. Fresa hemisférica frontal com dentes helicoidais

O dente helicoidal na fresa hemisférica frontal desenvolve-se em torno da ferramenta de acordo com o que é ilustrado na Figura 3.8.

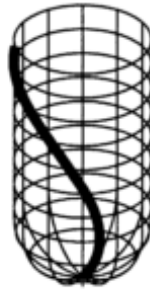


Figura 3.8 – Dente helicoidal na fresa frontal hemisférica, adaptado de [13].

As coordenadas de posição de um ponto genérico P situado na aresta de corte são idênticas às coordenadas deduzidas no subcapítulo 3.1.1. Neste caso, a fresa tem raio de ponta, como é ilustrado na figura anterior. Observa-se que os ângulos α_f e β_f , à semelhança da fresa cilíndrica, são iguais a zero. As grandezas deduzidas nas equações (3.6), (3.7) e (3.8) são iguais para esta fresa.

Para a sua modelação considerou-se, de acordo com o exposto anteriormente, que na base da ferramenta não existem forças de corte a atuar, concentrando-se unicamente nas faces laterais da ferramenta.

Como se observa na Figura 3.6, a zona MN existe neste tipo de fresa. A modelação foi dividida em duas partes. Uma referente à zona cilíndrica da fresa, ou seja, acima do ponto N , e outra referente à zona hemisférica MN . Desta forma obtêm-se as coordenadas em todos os pontos da aresta de corte. Na modelação das forças, os valores das duas zonas são somadas, obtendo-se as forças totais aplicadas ao longo da aresta de corte.

Recorrendo à equação (3.2), calcula-se a distância radial ($r(z)$) do ponto genérico P na zona MN .

$$r(z) = \frac{D-2R}{2} + \sqrt{R^2 - (R-z(\psi))^2} \quad (3.12)$$

O ângulo de imersão axial ($\kappa(z)$) é definido a partir da equação (3.2).

O ângulo de posição na aresta de corte é deduzido de acordo com a seguinte equação:

$$\psi(z) = \frac{(R+z-Rz)\tan\beta}{R} - \psi_{as} \quad (3.13)$$

Em que,

$$\psi_{as} = \frac{(R + M_z - R_z) \tan \beta}{R} \quad (3.14)$$

Sendo este um ângulo de posição do ponto P numa das extremidades do arco MN , é explícito que este ângulo é igual a zero. De acordo com as relações estabelecidas nas equações (3.6), (3.7) e (3.8), a equação (3.13) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\psi(z_j) = \frac{z(j) \tan \beta}{R} \quad (3.15)$$

3.2. Coeficientes de Corte

Os modelos analíticos de obtenção de forças de corte são desenvolvidos com base na geometria da apara e nos mecanismos de corte, criando-se funções matemáticas em função das variáveis espessura e largura da apara [5].

Em vários casos, esta modelação é feita separadamente, baseada em dois coeficientes que afetam, respetivamente, a área de corte (energia específica de corte) e o comprimento de corte. Devido à sua diferente natureza usar-se-á o índice “ c ” para os primeiros e o índice “ e ” para os segundos.

No caso da fresagem helicoidal, pelo facto de ser uma maquinaria tridimensional, as forças de corte vão sendo desenvolvidas nas direções radial, axial e tangencial. Da mesma forma, os coeficientes de corte apresentam três componentes, axial k_a , radial k_r e tangencial k_t , sendo para o caso do corte, k_{ac} , k_{rc} e k_{tc} e, para o caso da aresta de corte, k_{ae} , k_{re} e k_{te} .

A determinação destes coeficientes tem sido objeto de estudo de vários cientistas. Geralmente são feitos processos mecânicos de corte inversos, ou seja, são adquiridas as forças de corte através de experimentação e, com esses valores inseridos no modelo, são obtidos os vários coeficientes de corte. Para se aplicar esta metodologia, é necessária uma série de testes com diferentes taxas de avanços, mas com valores de imersões radiais e axiais constantes. Assume-se que a média das forças de corte é linearmente dependente do avanço de corte e, que os coeficientes se obtêm através de relações matemáticas entre a média das forças totais de corte e as forças na aresta de corte [5,13,26]. Este tipo de experimentação apresenta um elevado dispêndio de tempo e de custos. Em alternativa a obtenção destes coeficientes de corte pode também ser feita recorrendo a bases de dados. No entanto, as bases de dados existentes apresentam ainda muita falta de informação, sendo os valores apresentados referentes a corte ortogonal.

O facto de os coeficientes serem dependentes das características do material a maquinar, da geometria da ferramenta e da própria operação, implica que os modelos existentes apesar de viáveis sejam de difícil utilização, uma vez que, para cada operação de maquinagem é necessário fazer a calibração do modelo.

A compreensão do fundamento físico destas constantes é também objeto de estudo de vários investigadores. Várias opiniões foram formadas no sentido destes coeficientes não passarem de meras constantes para ajuste dos modelos matemáticos de obtenção de forças de corte. No entanto, de forma semelhante ao que acontece no corte ortogonal, operação que não apresenta distribuição de forças axiais, há uma tendência entre a comunidade científica para associar o coeficiente de corte tangencial à energia específica de corte (k_s) do material a maquinar, e o coeficiente radial de corte à capacidade do material resistir à propagação de uma fratura já existente (tenacidade).

No presente estudo os materiais utilizados foram o Aço Ck45 e o Alumínio Al7075-T651, pelo que seguidamente apresenta-se-á a determinação destes coeficientes para os dois materiais.

Aço Ck45

A obtenção dos valores dos coeficientes de corte para este material foi feita com base na literatura existente. Gonzalo [5], baseando-se em resultados experimentais, propôs um método para a determinação dos coeficientes de corte para o corte ortogonal, utilizando modelos analíticos de corte inversos.

Foi necessário definir as condições de corte enunciadas na Tabela 3.1, para o processo experimental.

Tabela 3.1 – Condições de corte para os testes de fresagem [5].

Condições de corte	Valores
Velocidade de corte (v_c)	60; 80; 90; 100; 110; 120 m/min
Profundidade de corte (axial) (p)	2 mm
Profundidade de corte (radial) (a_d)	16 mm
Avanço por dente (f_a)	0,05; 0,06; 0,075; 0,090 mm/dente
Ângulo de hélice (β)	0°
Material da ferramenta	Carbide
Diâmetro da ferramenta	16 mm
Ângulo de ataque (γ)	6 – 10°

Tabela 3.2 é possível observar os resultados utilizados na experimentação que será referida no capítulo 4.

Tabela 3.2 – Valores lineares dos coeficientes específicos de corte do Aço CK45 para $\gamma=6^\circ$ e $v_c=100$ m/min [5].

Aço Ck45	Valores
k_{tc}	1730 N/mm ²
k_{te}	4 N/mm
k_{rc}	723 N/mm ²
k_{re}	26 N/mm
k_{ac}	-188 N/mm ²
k_{ae}	-6 N/mm

Admitiu-se que os valores axiais dos coeficientes de corte têm uma relação com os valores da dureza Brinell uma vez que, os valores destes coeficientes correspondem a uma força axial aplicada sobre a ferramenta, em que a aresta tende a penetrar no aço de uma forma similar aos ensaios de dureza Brinell. Este valor inicial para o k_{ac} , foi calibrado através dos ensaios realizados.

Alumínio Al7075 – T651

Para a determinação dos coeficientes de corte do alumínio Al7075-T651, foram reaproveitados os dados de um estudo anterior com o objetivo de determinar os coeficientes de corte em corte ortogonal.

Na Tabela 3.3, observam-se os parâmetros de corte para os ensaios respetivos.

Tabela 3.3 – Variáveis de corte para os ensaios de corte ortogonal do alumínio 7075.

Variáveis de corte	Valores
Largura de corte (b)	3 mm
Ângulo de Posição (χ)	90°
Avanços	0,05; 0,1; 0,2; 0,4 mm

Utilizando então as equações do corte ortogonal, teremos a espessura de aparta antes do corte:

$$h = a \sin \chi \quad (3.16)$$

Medindo-se as espessuras das aparas, após o corte, ter-se-á a relação de corte através da seguinte equação.

$$r = \frac{h}{h_c} \quad (3.17)$$

A Tabela 3.4 mostra os valores das medições das espessuras de aparas após o corte. Através do ângulo de posição da ferramenta calculou-se a espessura da apara antes do corte e, com os valores medidos das forças de corte e de avanço traçaram-se duas retas de regressão linear.

Tabela 3.4 – Medição das espessuras de aparas após o corte ortogonal do alumínio Al7075 e valores dos parâmetros de maquinaria.

Medição de espessura de apara gerada pelo corte ortogonal do alumínio Al7075-T651										
Ensaio a seco										
V.Corte (m/min)	γ ($^\circ$)	a (mm)	hc (1) (mm)	hc (2) (mm)	hc (3) (mm)	Média (mm)	r	h (mm)	F_c (N)	F_a (N)
20	0	0,05	0,135	0,151	0,15	0,145	0,308	0,04	248,29	163,56
20	0	0,1	0,23	0,29	0,25	0,257	0,348	0,09	430,34	267,08
20	0	0,2	0,47	0,435	0,445	0,450	0,397	0,18	720,28	415,50
20	0	0,4	0,76	0,81	0,79	0,787	0,455	0,36	1310,90	663,46
20	5	0,05	0,127	0,138	0,152	0,139	0,322	0,04	230,09	135,57
20	5	0,1	0,26	0,235	0,234	0,243	0,368	0,09	398,04	214,12
20	5	0,2	0,36	0,4	0,355	0,372	0,481	0,18	660,84	316,79
20	5	0,4	0,72	0,765	0,775	0,753	0,475	0,36	1184,90	484,81
50	0	0,05	0,17	0,155	0,168	0,164	0,272	0,04	261,89	227,89
50	0	0,1	0,365	0,355	0,29	0,337	0,266	0,09	434,46	306,14
50	0	0,2	0,45	0,41	0,41	0,423	0,422	0,18	742,64	468,63
50	0	0,4	0,78	0,743	0,805	0,776	0,461	0,36	1188,30	567,36
50	5	0,05	0,13	0,141	0,121	0,131	0,342	0,04	226,72	163,17
50	5	0,1	0,268	0,275	0,24	0,261	0,343	0,09	388,90	230,38
50	5	0,2	0,35	0,36	0,37	0,360	0,497	0,18	685,17	373,56
50	5	0,4	0,665	0,641	0,67	0,659	0,543	0,36	1101,20	475,94
100	0	0,05	0,115	0,12	0,115	0,117	0,383	0,04	228,46	132,53
100	0	0,1	0,22	0,248	0,238	0,235	0,380	0,09	382,26	236,72
100	0	0,2	0,355	0,362	0,362	0,360	0,497	0,18	651,54	363,19
100	0	0,4	0,625	0,585	0,6	0,603	0,593	0,36	1020,00	423,63
100	5	0,05	0,118	0,112	0,118	0,116	0,385	0,04	209,25	131,85
100	5	0,1	0,216	0,215	0,198	0,210	0,426	0,09	358,23	192,82
100	5	0,2	0,36	0,335	0,32	0,338	0,528	0,18	608,93	256,29
100	5	0,4	0,58	0,625	0,63	0,612	0,585	0,36	924,73	298,80

As forças de corte são dadas pelas seguintes equações.

$$F_t = k_{tc}bh + k_{te}b \quad (3.18)$$

$$F_r = k_{rc}bh + k_{re}b \quad (3.19)$$

A Figura 3.9 mostra as linhas de regressão para as forças de avanço e de corte.

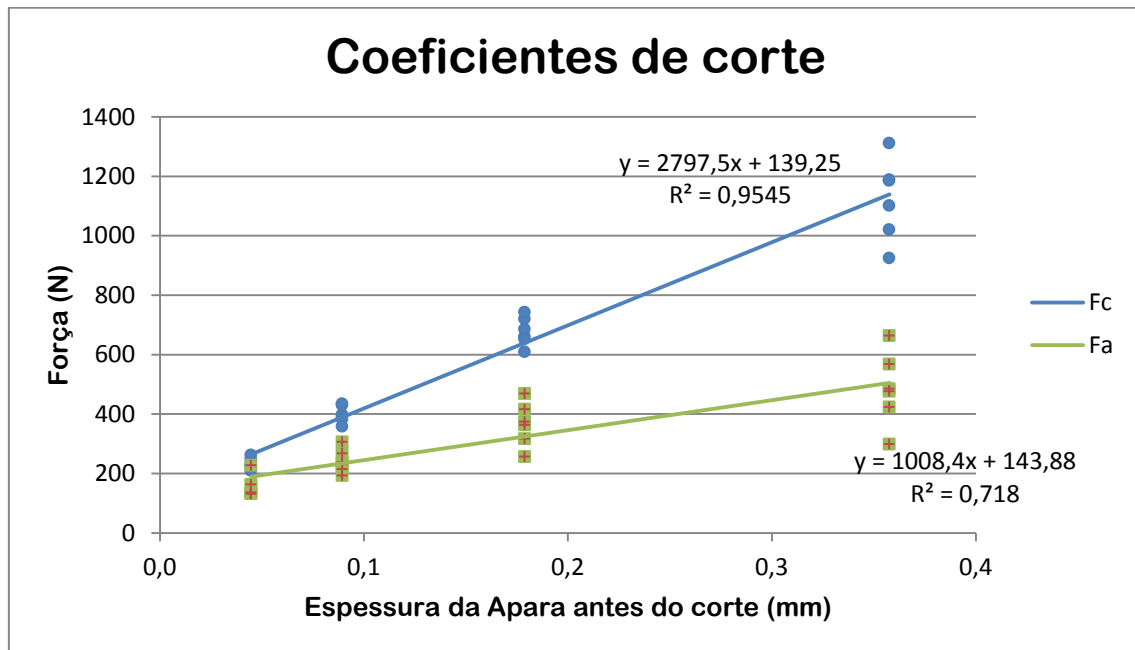


Figura 3.9 – Gráfico das regressões lineares das Forças de Corte (F_c) e de Avanço (F_a).

Considera-se que a variável x , correspondente à ordenada na origem, é equivalente à largura da apra h . Recorrendo às equações (3.18) e (3.19) e, tendo em conta a largura de corte de 3 mm, calculam-se os valores dos coeficientes de corte para o alumínio. Estes valores estão representados na tabela seguinte.

Tabela 3.5 – Valores lineares dos coeficientes específicos de corte do Alumínio Al7075-T651.

Alumínio Al7075-T651	Valores
k_{tc}	932,8 N/mm ²
k_{te}	46,5 N/mm
k_{rc}	336,13 N/mm ²
k_{re}	47,96 N/mm
k_{ac}	48,75 N/mm ²
k_{ae}	2,05 N/mm

Como se pode verificar o corte ortogonal só nos fornece quatro coeficientes de corte, relativos ao plano de maquinagem, não sendo possível extrair dados na direção axial. Assim, não existindo dados experimentais para estes valores, foram utilizados os valores dos coeficientes de corte propostos por Altintas e Budak [27] num estudo que pretendia identificar as forças de corte e os coeficientes utilizando fresas de geometria idênticas às fresas utilizadas neste trabalho.

3.3. Modelação das Forças de Corte

As forças diferenciais, tangencial (dF_t), radial (dF_r) e axiais (dF_a) a atuar num ponto genérico P , localizado na aresta de corte, são calculadas de acordo com a seguinte equação.

$$\begin{cases} dF_t = (k_{te} + k_{tc} h(\phi, \kappa)) db \\ dF_r = (k_{re} + k_{rc} h(\phi, \kappa)) db \\ dF_a = (k_{ae} + k_{ac} h(\phi, \kappa)) db \end{cases} \quad (3.20)$$

A espessura da apara antes do corte, $h(\phi, \kappa)$ é dada pela equação (3.21).

$$h(\phi, \kappa) = a_d \sin \phi \sin \kappa \quad (3.21)$$

O comprimento infinitesimal de corte, segundo a direção da velocidade de corte (db), é calculado através da expressão seguinte.

$$db = \frac{dz}{\sin \kappa} \quad (3.22)$$

Onde dz representa o incremento axial.

A posição de um ponto P genérico na aresta de corte de cada dente é obtida através do modelo representado no capítulo 3.1. Obtidos os valores de espessura da apara, os coeficientes de corte, definida a geometria da aresta de corte e a posição de um ponto genérico P , as forças diferenciais podem ser expressas no sistema da coordenadas cartesianas.

$$[dF_{xyz}] = [T][dF_{rta}] \quad (3.23)$$

Expandindo as matrizes têm-se que,

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\phi \sin\kappa & -\cos\phi & -\sin\phi \cos\kappa \\ -\cos\phi \sin\kappa & \sin\phi & -\cos\phi \cos\kappa \\ -\cos\kappa & 0 & -\sin\kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_r \\ dF_t \\ dF_a \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

A modelação analítica efetuada teve por base a equação (3.24).

$$\begin{cases} F_x(\phi) = \sum_{j=1}^{N_j} F_{xj}[\phi(z)] = \sum_{j=1}^{N_j} \int_{z_1}^{z_2} \begin{bmatrix} -dF_{rj} \sin\phi_j \sin\kappa_j & -dF_{tj} \cos\phi_j & -dF_{aj} \sin\phi_j \cos\kappa_j \end{bmatrix} dz \\ F_y(\phi) = \sum_{j=1}^{N_j} F_{yj}[\phi(z)] = \sum_{j=1}^{N_j} \int_{z_1}^{z_2} \begin{bmatrix} -dF_{rj} \sin\phi_j \sin\kappa_j & dF_{tj} \sin\phi_j & -dF_{aj} \cos\phi_j \cos\kappa_j \end{bmatrix} dz \\ F_z(\phi) = \sum_{j=1}^{N_j} F_{zj}[\phi(z)] = \sum_{j=1}^{N_j} \int_{z_1}^{z_2} \begin{bmatrix} -dF_{rj} \sin\phi_j & 0 & -dF_{aj} \sin\kappa_j \end{bmatrix} dz \end{cases} \quad (3.25)$$

Na modelação apresentada consideram-se as forças de reação positivas que as têm o sentido da peça para a ferramenta, como se mostra na Figura 3.10 (b).

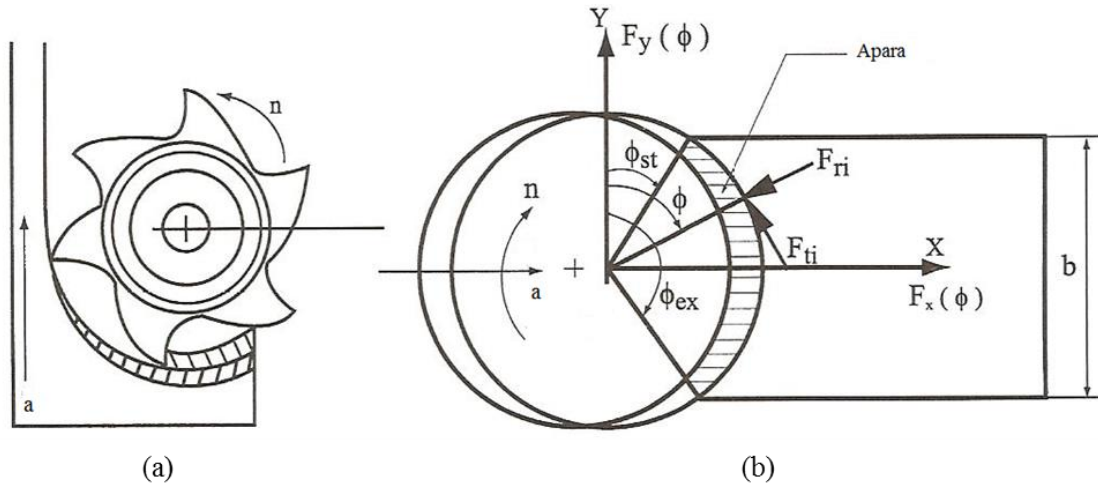


Figura 3.10 – Movimentos de corte: (a) Movimentos de avanço e rotação da ferramenta; (b) Geometria da fresagem, ângulos de entrada, saída e de imersão [12].

A integração numérica da equação (3.25) foi realizada utilizando o programa MATLAB. Esta foi realizada em incrementos angulares relativos à rotação da fresa e em incrementos axiais relativos à progressão axial do dente helicoidal. A figura seguinte mostra o algoritmo seguido.

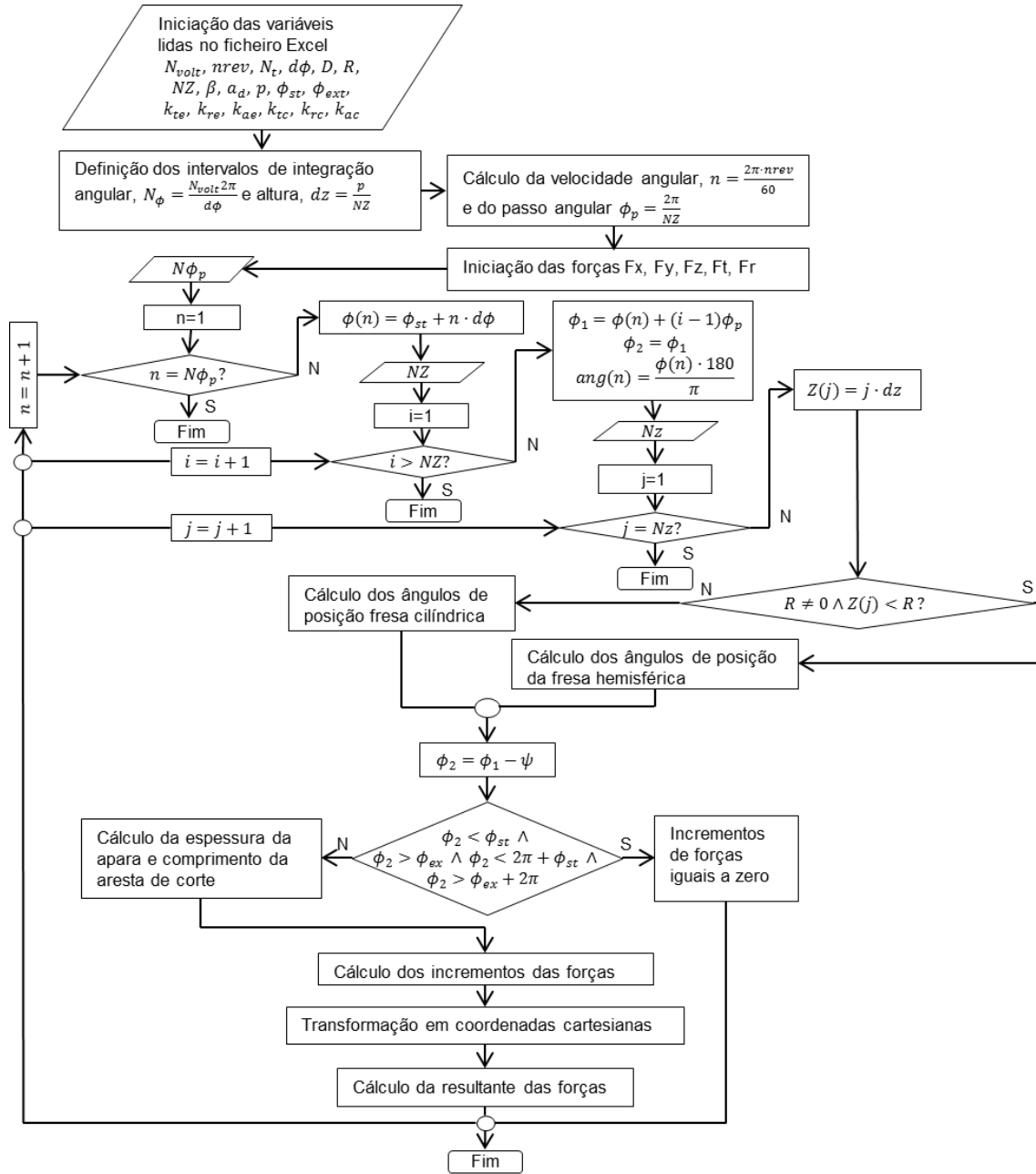


Figura 3.11 – Algoritmo da simulação das forças de corte.

São ilustradas na figura anterior, as várias integrações realizadas para o cálculo das forças de corte.

Para se identificar a zona da aresta de corte em contacto com a peça a maquinar, cilíndrica ou hemisférica, calculou-se $Z(z)$ utilizando uma condição *if* para as equações (3.26).

$$\begin{cases} \text{Se } R \neq 0 \wedge Z(z) < R, \text{ Zona Hemisférica} \\ \text{Se } R = 0 \vee Z(z) > R, \text{ Zona Cilíndrica} \end{cases} \quad (3.26)$$

De forma semelhante, utilizando condições *if e*, tendo em conta que a simulação de forças foi feita considerando uma volta e meia da ferramenta, analisou-se em cada instante quais os dentes da fresa que estariam a maquinar e os que já não estavam em contacto com a peça, sendo por isso a força de corte nula. A modelação foi feita definindo as posições em que as forças de corte são nulas, considerando as restantes situações para efeito de cálculo.

Tendo em conta os vários dentes da fresa, existem três considerações para garantir que o dente j não está em processo de corte. Se o dente j ainda não tiver entrado em contacto com a peça a maquinar, a força de corte por ele provocada é nula. A força de corte é também nula se, o dente j já efetuou o corte encontrando-se já numa posição angular superior a ϕ_{ext} , ou seja, fora da peça. Se, por outro lado, o dente j já deu uma volta completa desde o ponto inicial de rotação e, a sua posição angular for superior a ϕ_{ext} , as forças de corte são também nulas. As equações (3.27) são referentes à modelação explicada neste parágrafo.

$$F_{xyz}(n) = 0 \text{ se, } \begin{cases} \phi_j < \phi_{st} & ; \text{o dente } j \text{ ainda não entrou na peça} \\ \phi_j > \phi_{ex} \wedge \phi_j < 2\pi + \phi_{st} & ; \text{o dente } j \text{ já saiu e não voltou a entrar na peça} \\ \phi_j > \phi_{ex} + 2\pi & ; \text{o dente } j \text{ já entrou e voltou a sair da peça} \end{cases} \quad (3.27)$$

Garante-se que as forças de corte são nulas se ocorrer uma das três condições definidas.

A integração das três variáveis ilustradas na Figura 3.11 garante que a cada incremento angular e em altura, são consideradas as três componentes, axial, radial e tangencial das forças de corte, em cada ponto genérico P situado na aresta de corte do dente j como se mostra na Figura 3.12.

Da equação (3.20) resulta evidente que o modelo analítico depende fortemente dos coeficientes de corte. O coeficiente K_{tc} , correntemente conhecido por energia específica de corte relacionada com o material e com o mecanismo de deformação plástica na formação da apar. Os restantes coeficientes têm um carácter mais fenomenológico, permitindo o ajustamento ao comportamento usual da maquinagem. A determinação destes coeficientes só pode ser realizada pela via experimental, o que requer recursos materiais que não foram possíveis no âmbito deste trabalho.

Assim, para dar continuidade ao modelo, vão ser utilizados valores dos coeficientes de corte encontrados na literatura existente, para situações consideradas idênticas. No entanto, chama-

se a atenção que com a exceção do k_{tc} , que tem um fundamento físico conhecido, a comparabilidade dos coeficientes de corte não pode ser discutível.

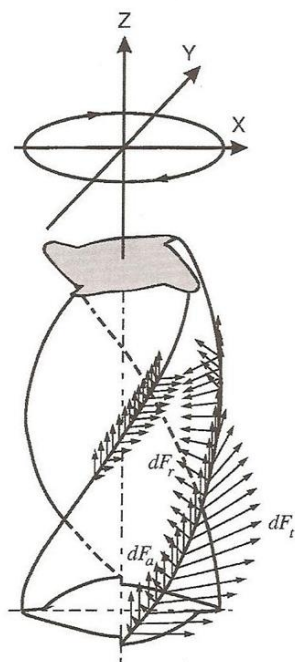


Figura 3.12 – Forças incrementais na fresa frontal helicoidal [12].

No anexo 1 é disponibilizado o ficheiro de programação em MATLAB, com a modelação de forças proposta. Para efeitos de programação, houve a necessidade de se criar novas variáveis de cálculo, referindo-se por isso o nome de todas as variáveis no programa.

3.5.Resultados

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados analíticos de algumas modelações, tendo em conta diferentes parâmetros de corte e fresas. Nesta modelação não se considerou a lubrificação durante o processo de maquinação.

3.5.1.Aço Ck45

A Figura 3.13 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal utilizando uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 60° , com uma velocidade de rotação 800 rpm, profundidade de corte 1,5 mm e avanço por dente de 0,03 mm.

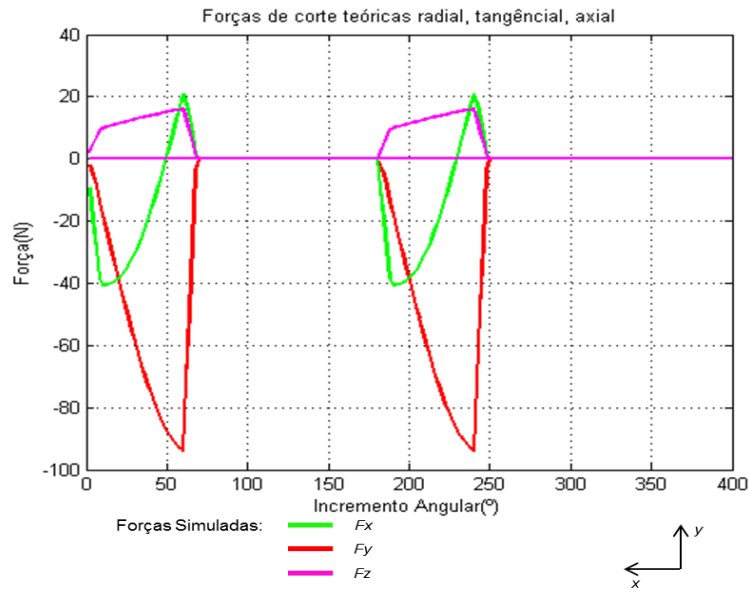


Figura 3.13 – Modelação das forças de corte teóricas para Ck45, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

Na Figura 3.14 são apresentadas as curvas da simulação de forças utilizando uma fresa cilíndrica de três dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 60° , com uma velocidade de rotação de 800 rpm, profundidade de corte de 1,5 mm e avanço por dente de 0,03 mm.

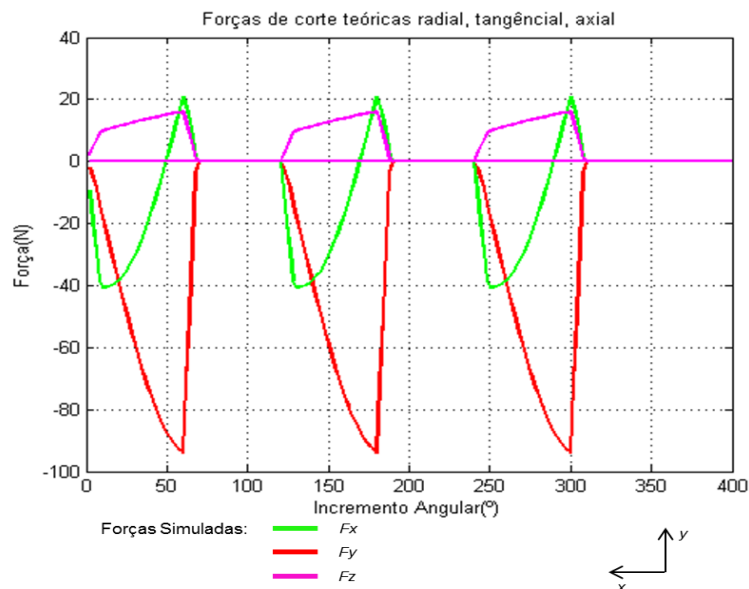


Figura 3.14 – Modelação das forças de corte teóricas para Ck45, fresa cilíndrica de três dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

Observa-se nas duas figuras anteriores que o passo angular entre os dentes é diferente para as duas fresas consideradas uma vez que, a fresa com um passo angular menor tem três dentes e a com passo angular maior tem dois dentes.

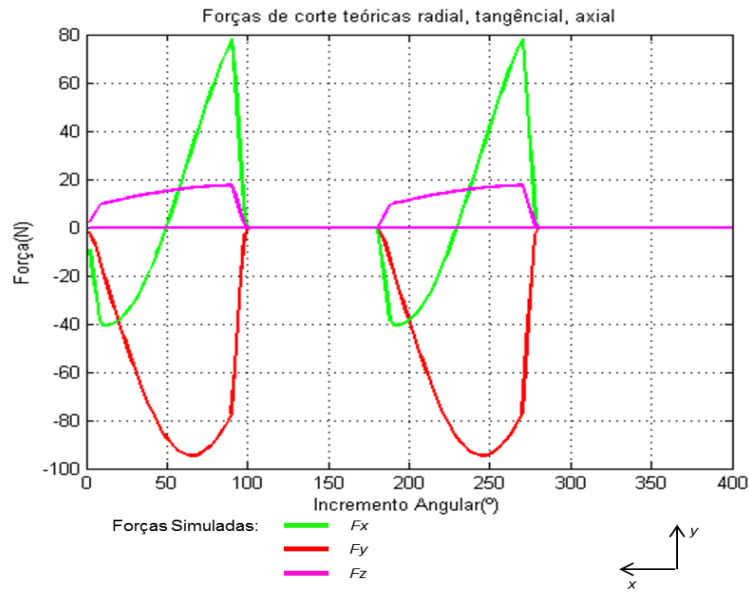


Figura 3.15 – Modelação das forças de corte teóricas para Ck45, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

Na Figura 3.15 são apresentadas as curvas da simulação de forças de corte com fresagem helicoidal utilizando uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 90° , com uma velocidade de rotação de 800 rpm, profundidade de corte de 1,5 mm e avanço por dente de 0,03 mm.

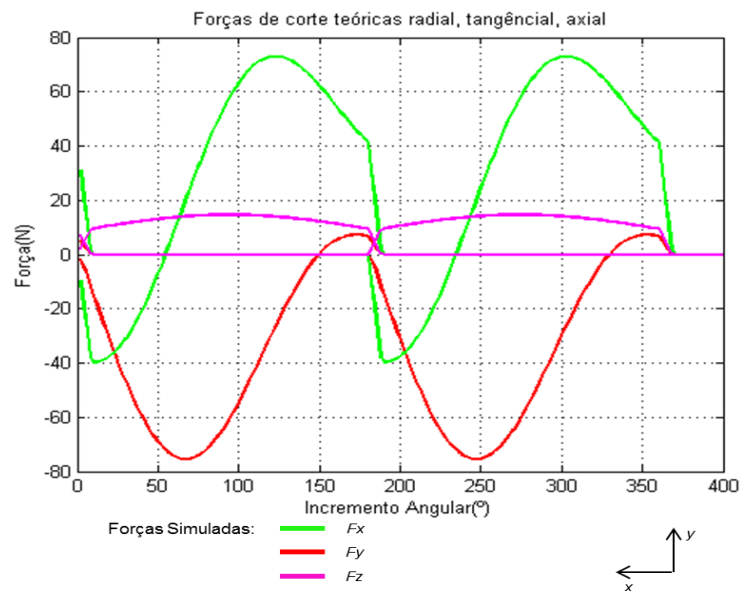


Figura 3.16 – Modelação das forças de corte teóricas para Ck45, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=180^\circ$, 600 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,02$ mm.

Na Figura 3.16 são apresentadas as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal utilizando uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 180° , com uma velocidade de rotação de 600 rpm, profundidade de corte de 1,5 mm e avanço por dente de 0,02 mm.

Na figura anterior observa-se uma imersão de 180° da fresa, coincidindo o ponto de saída do dente com o ponto de entrada do dente seguinte. Este facto deve-se à utilização de uma fresa com dois dentes.

Na Figura 3.17 são apresentadas as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal utilizando uma fresa hemisférica de três dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 53° , com uma velocidade de rotação de 600 rpm, profundidade de corte de 6 mm e avanço por dente de 0,02mm.

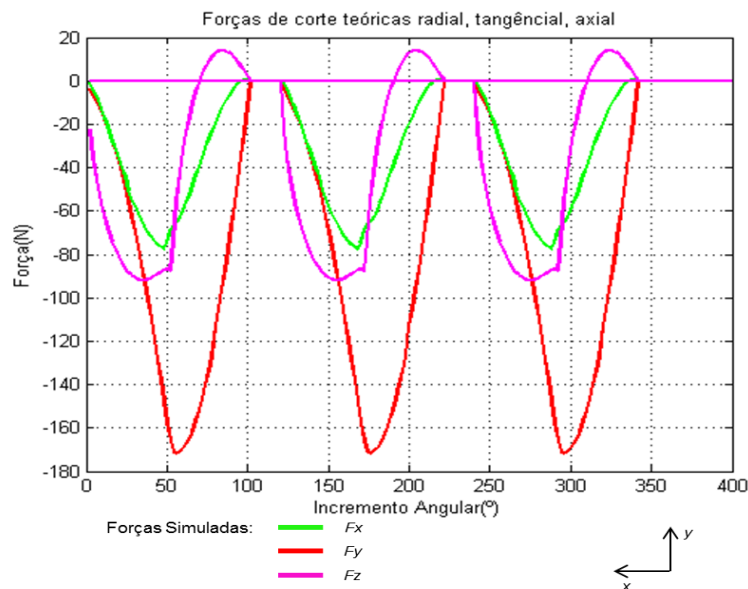


Figura 3.17 – Modelação das forças de corte teóricas para Ck45, fresa hemisférica de três dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0$, $\phi_{ex}=53^\circ$, 600 rpm, $p=6$ mm e $a_d=0,02$ mm.

Observa-se na figura anterior, que as forças de corte, utilizando fresas hemisféricas, são maioritariamente negativas, de acordo com a convenção escolhida.

3.5.2. Alumínio 7075 – T651

A Figura 3.18 apresenta as curvas da modelação de fresagem helicoidal utilizando uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 30° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm, profundidade de corte de 2 mm e avanço por dente de 0,07mm.

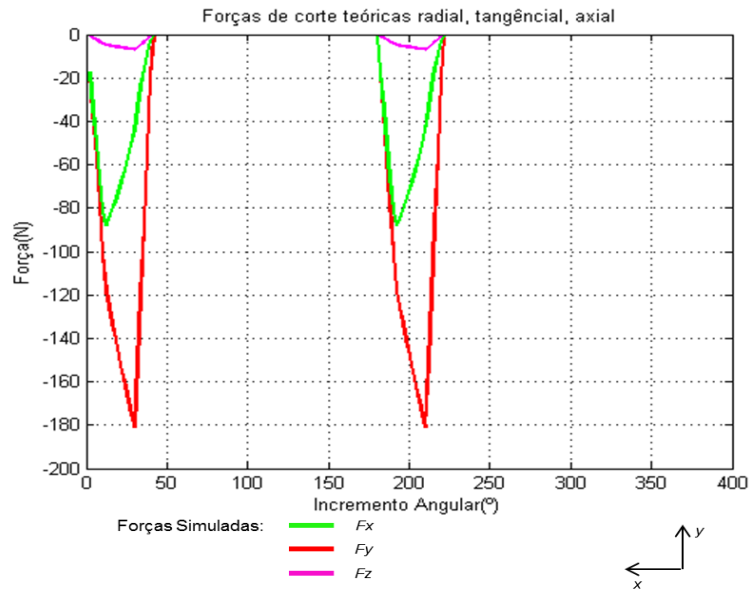


Figura 3.18 – Modelação das forças de corte teóricas para o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=30^\circ$, 3000 rpm, $p=2$ mm e $a_d=0,07$ mm.

Observa-se que com uma imersão radial de trinta graus, as forças de corte são negativas, de acordo com o referencial considerado.

A Figura 3.19 apresenta as curvas da modelação de fresagem helicoidal utilizando uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 90° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm, profundidade de corte de 2,5 mm e avanço por dente de 0,05mm.

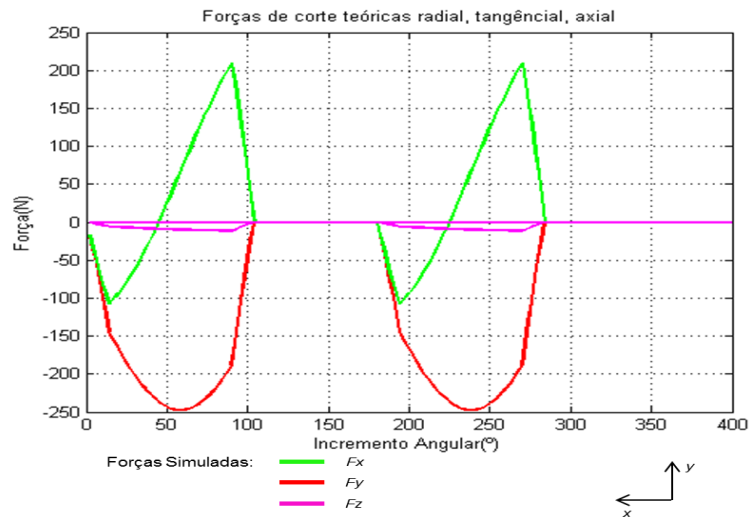


Figura 3.19 – Modelação das forças de corte teóricas para o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5$ mm e $a_d=0,05$ mm.

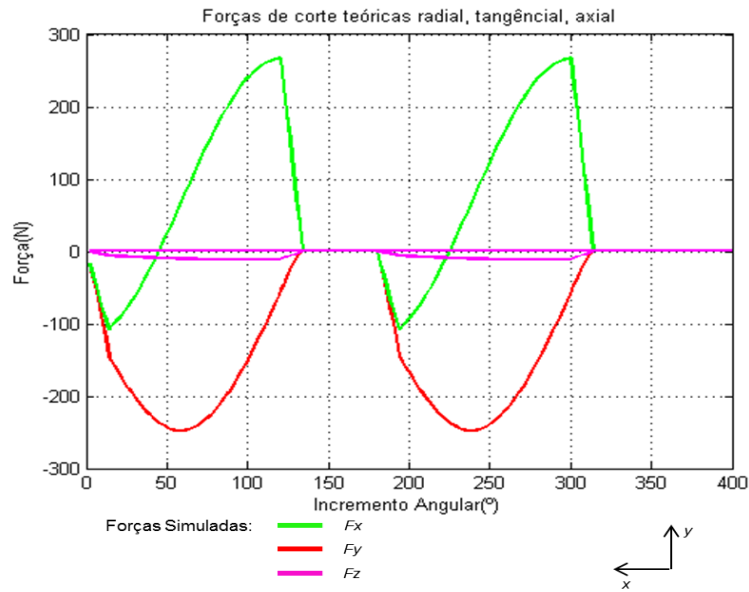


Figura 3.20 – Modelação das forças de corte teóricas para o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=120^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5$ mm e $a_d=0,05$ mm.

Na Figura 3.20 ilustram-se as curvas da modelação de fresagem helicoidal utilizando uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 120° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm, profundidade de corte de 2,5 mm e avanço por dente de 0,05mm.

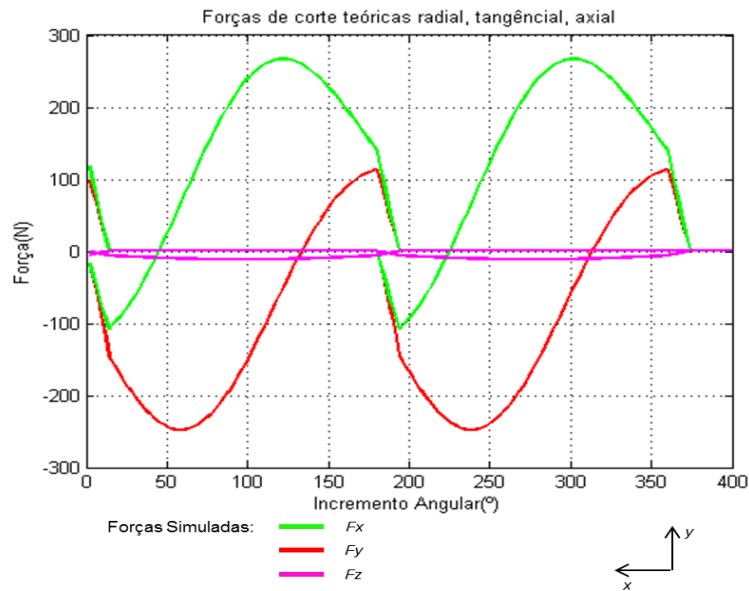


Figura 3.21 – Modelação das forças de corte teóricas para o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=180^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5$ mm e $a_d=0,05$ mm.

Na Figura 3.21 ilustram-se as curvas da modelação de fresagem helicoidal utilizando uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 180° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm, profundidade de corte de 2,5 mm e avanço por dente de 0,05mm.

Observa-se nas duas figuras anteriores que o aumento da imersão radial diminui a distância angular entre o ponto de saída de um dente e o ponto de entrada do dente seguinte.

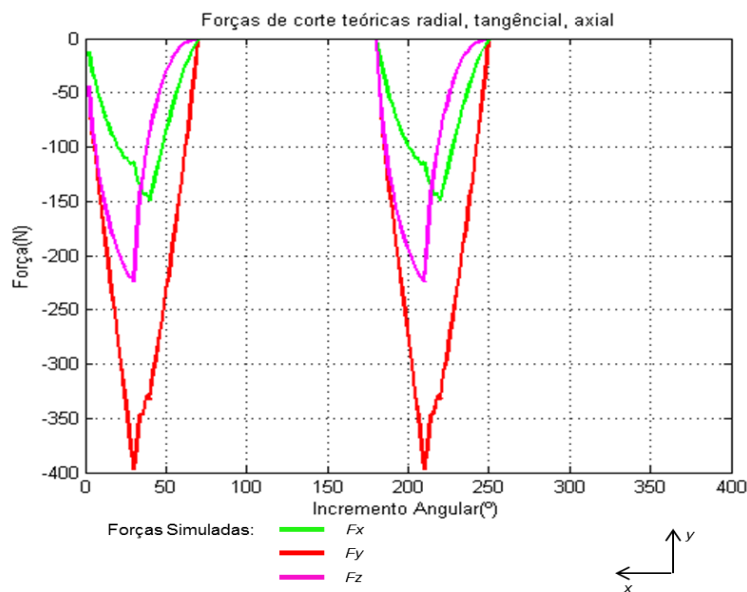


Figura 3.22 – Modelação das forças de corte teóricas para o Al7075, fresa hemisférica de dois dentes, $D=10$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=30^\circ$, 3000 rpm, $p=6$ mm e $a_d=0,05$ mm.

Na Figura 3.22 pode-se observar as curvas da modelação de fresagem helicoidal utilizando uma fresa hemisférica de dois dentes, diâmetro de 10 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 30° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm, profundidade de corte de 6 mm e avanço por dente de 0,05mm.

Observa-se na figura anterior que os valores das forças para a simulação com fresas hemisféricas apresentam valores negativos de acordo com o referencial considerado, como também foi observado para o aço Ck45.

Capítulo 4

Verificação experimental

Neste capítulo é apresentada a metodologia experimental adotada para a validação do modelo proposto. O procedimento experimental foi realizado no laboratório de tecnologia mecânica do DEMI (Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa) utilizando o centro de maquinagem ilustrado na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Centro de Maquinagem do Laboratório de Tecnologia Mecânica do DEMI

Os resultados da experimentação descrita neste capítulo são apresentados no final do mesmo.

4.1. Metodologia Experimental

4.1.1. Preparação de material

Para efetuar a verificação experimental do modelo proposto, foi necessário preparar blocos de Necuron, que serviram para fazer a calibração da instrumentação utilizada na medição das forças, e também, blocos de Aço CK45 e Alumínio 7075-T651. Na Figura 4.2 apresentam-se as dimensões dos blocos de ensaio e a imagem 3D de um bloco de ensaio.

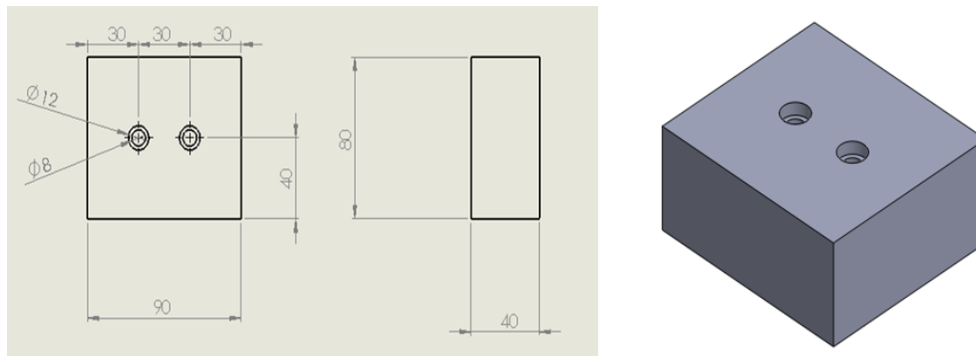


Figura 4.2 – Dimensões dos blocos de ensaio.

Efetuaram-se operações de corte com uma serrote mecânico obtendo-se as dimensões finais dos blocos de ensaio. Para garantir a aquisição de valores das forças de corte coerentes, foi necessário facejar a face superior do bloco de ensaio, como se pode observar na Figura 4.3. Garantiu-se assim, a coerência das profundidades de corte, sendo esta, a mesma durante todo o ensaio de remoção de aparas. Garantiu-se, também, a inexistência de imperfeições nas faces onde se efetuaram ensaios de remoção de aparas.



Figura 4.3 – Operação de maquinagem de facejamento [24].

A fixação dos blocos de ensaio à célula de carga foi feita através de parafusos. Com um engenho de furar efetuaram-se dois furos simétricos nos blocos de ensaio, com o diâmetro de 8 mm para a parte roscada do parafuso e, de 16 mm para a cabeça do parafuso. A Figura 4.4 ilustra a forma final de um bloco de ensaio de alumínio.

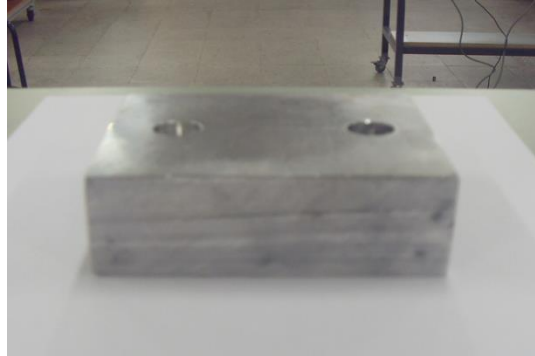


Figura 4.4 – Bloco de ensaio de Alumínio.

4.1.2. Instrumentos utilizados

Para garantir a estabilidade de toda a montagem, obtendo-se assim resultados credíveis, criou-se uma base em aço fixa à mesa de trabalho do centro de maquinagem, onde por sua vez, foi fixa a célula de carga através de ligações roscadas, como se pode ver na Figura 4.5.

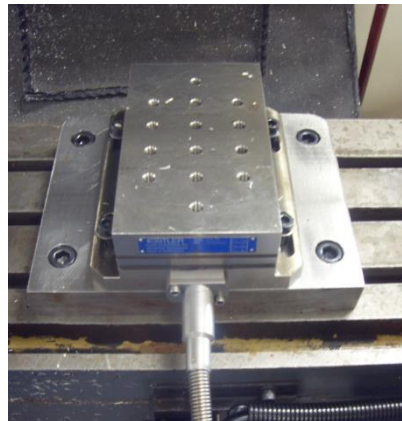


Figura 4.5 – Ilustração da montagem da célula de carga na mesa de trabalho do centro de maquinagem.

Houve o cuidado de se retificar as duas faces da base de forma a garantir que a célula de carga estaria perfeitamente alinhada com a mesa de trabalho do centro de maquinagem, diminuindo-se assim, os possíveis desvios entre os eixos de trabalho do centro de maquinagem e os eixos da célula de carga. A operação de retificação é uma operação

bastante precisa por conseguir trabalhar na ordem de grandeza dos micrómetros. O facto do alinhamento dos eixos de trabalho ser fulcral para a obtenção de resultados coerentes, levou a escolher a operação de retificação em vez de o facejamento. Foram realizados quatro furos nos quatro cantos do bloco de aço que serviram para fixar a base à mesa de trabalho do centro de maquinaria e efectuaram-se outros quatro furos que serviram para fixar a célula de carga. Nestes últimos efectuou-se uma operação de roscagem.

O procedimento experimental realizou-se no laboratório de tecnologia mecânica do DEMI (Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa).

Para os ensaios de corte foram utilizadas várias fresas frontais cilíndricas e hemisféricas com dentes helicoidais. Na Tabela 3.1 pode-se observar as características das várias fresas utilizadas.

Tabela 4.1 - Características das fresas utilizadas no processo experimental [23].

Tipos de fresas frontais utilizadas					
Tipo	Diâmetro (mm)	Nº dentes	Ângulo de hélice (º)	Raio do nariz (mm)	Fabricante
Cilíndrica	12	2	30	0	Vallorbe
Cilíndrica	12	3	30	0	Vallorbe
Cilíndrica	16	4	30	0	Brambilla
Hemisférica	10	3	35	5	Vallorbe
Hemisférica	10	4	35	5	Vallorbe
Hemisférica	10	2	35	5	Vallorbe

Com o auxílio de um comparador, procedeu-se à fixação da célula de carga e da peça a maquinar na mesa de trabalho tendo o cuidado de alinhar os vários eixos. A Figura 4.6 ilustra esta montagem, onde se pode observar um bloco de Necuron, material de boa maquinabilidade, que serviu para calibrar os vários instrumentos de medida.



Figura 4.6 – Montagem experimental com bloco de Necuron.

A aquisição de dados foi feita com o auxílio de um amplificador, responsável por ampliar o sinal recebido em volts da célula de carga nos três canais de leitura (F_x , F_y e F_z), e posteriormente enviar para um computador, onde foi analisado com o auxílio dos programas LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) e MATLAB.



(a)



(b)

Figura 4.7 – (a) Processador de dados; (b) Amplificador.

4.1.3. Aquisição de dados

A aquisição de dados foi realizada recorrendo ao programa LabVIEW, utilizado na realização das medições e aquisição. Este programa, desenvolvido pela NI (*National Instruments*), é uma linguagem de programação gráfica que usa ícones em vez de linhas de código para criar aplicações. Enquanto as linguagens de programação mais utilizadas usam linhas de código para determinar ações do programa, o LabVIEW utiliza os sinais, informação que ao fluir pelos diversos ícones determina as ações do programa [28].

Para aquisição dos dados das forças de corte foi necessário criar um programa de instrumentos virtuais, com o objetivo de fazer o tratamento do sinal recebido do amplificador em Volts, transformando-o através das transformadas de Laplace, em Newtons. Foi criada uma *state machine*, sendo possível dividir a aquisição de dados e o tratamento dos mesmos em vários passos.

Uma *state machine* é composta por uma ou mais estruturas de ações dentro de uma estrutura de *while loop*, sendo que a ação estará sempre a decorrer até que o controlador da mesma apresente a informação de “false”, ou seja, dada ordem para passar à ação seguinte.

Para o trabalho experimental desta dissertação foi criada uma *state machine* de quatro estados como se mostra na Figura 4.8.

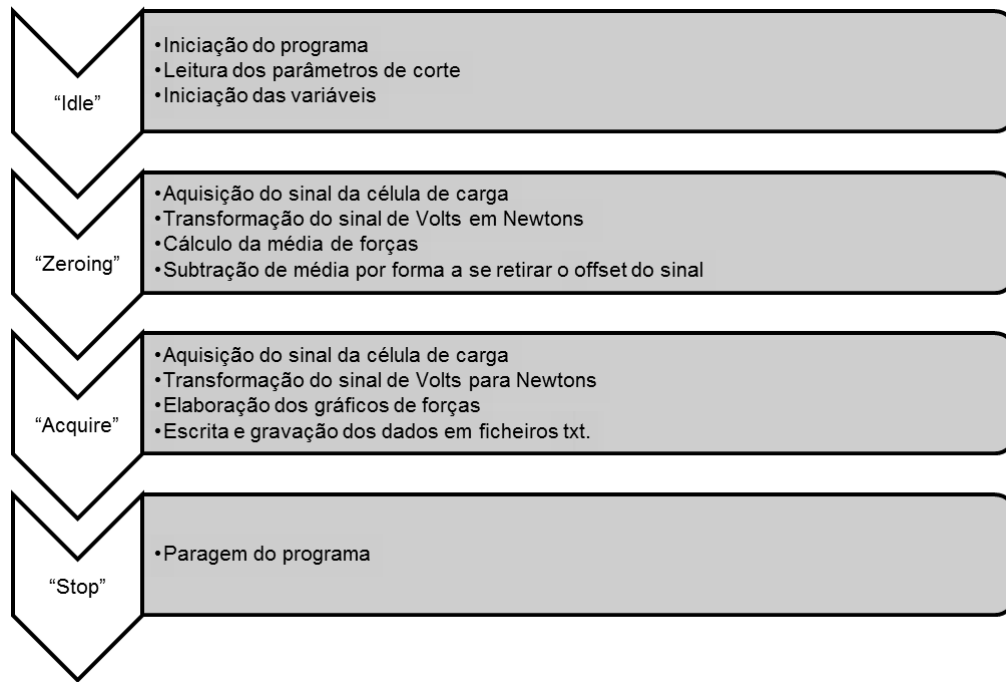


Figura 4.8 – Estrutura do programa de aquisição de dados em LabVIEW.

No primeiro estado, "Idle", dá-se a iniciação do programa lendo-se as variáveis de corte, utilizadas para dar nome ao ficheiro de dados txt. gerado. Este estado só termina quando é dada ordem para o estado seguinte começar.

No segundo estado foi feito o *offset* do sinal. A célula de carga é constituída por pequenos cristais piezoelétricos. A recuperação destes cristais ao seu estado inicial, após a aplicação de uma força, pode levar algum tempo gerando campos elétricos residuais, e por sua vez, um sinal que foi subtraído às medições seguintes. À semelhança do estado anterior, este estado também só termina quando é dada ordem para o estado seguinte começar.

O terceiro estado é o único que é realizado com o centro de maquinagem em funcionamento. Durante o ensaio de corte o sinal enviado da célula de carga para o amplificador e para o programa de aquisição de dados é transformado de Volts em Newtons. A aquisição deste sinal foi feita em períodos de dois segundos a uma frequência de 40.000Hz obtendo-se 80.000 pontos. Este estado foi programado para se poder fazer várias aquisições consecutivas de dois segundos. Por último, foram escritos ficheiros txt. de acordo com as variáveis de corte lidas inicialmente e gravadas num *cluster*.

O último estado do programa "Stop" tem a finalidade de cessar o programa de aquisição de dados.



Figura 4.9 – Painel principal do programa de aquisição de dados.

A Figura 4.9 mostra o painel principal do programa efetuado para a aquisição de dados.

Como foi mencionado, a aquisição do sinal foi feita com uma taxa de amostragem de 40.000Hz. Este valor foi calculado de forma a se garantir que em cada ensaio, de acordo com a imersão da ferramenta e a velocidade de rotação da mesma, fosse obtido um número de valores mínimo para se efetuarem os gráficos de forças. Foi escolhido o valor máximo calculado, uma vez que garante a aquisição de dados para todos os ensaios.

4.1.4. Ensaios de corte

Como já foi referido anteriormente, na fase de testes e da implementação da metodologia experimental usou-se o material Necuron, composto bastante macio, que permitiu testar os instrumentos descritos, em condições mais agressivas no ponto de vista do corte, podendo-se calibrar os mesmos e adaptar o procedimento experimental aos ensaios de corte seguintes com materiais mais duros.

Nos vários ensaios efetuou-se um corte em linha reta sempre com a mesma direção de forma a ser intuitiva a localização dos eixos da célula de carga, adequando-os aos valores das forças de corte obtidas segundo os eixos considerados na modelação analítica. Teve-se em consideração o facto de na modelação analítica ter-se considerado o sentido positivo das forças de corte apontados para a ferramenta e, a célula de carga ter os eixos positivos orientados para a peça. A Figura 4.10 ilustra a configuração dos vários ensaios realizados.

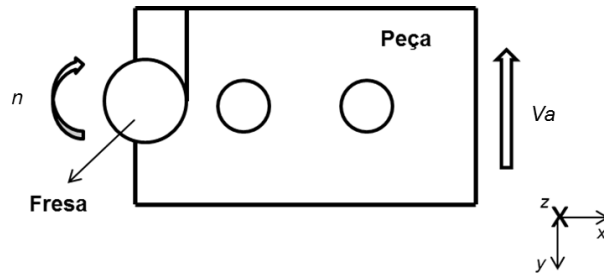


Figura 4.10 – Configuração dos ensaios de corte

Sendo que, V_a representa a velocidade de avanço da peça segundo o plano de corte, podendo ser calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$V_a = a_d \times Z \times n \quad (4.1)$$

em que, n representa a velocidade de rotação da fresa.

Tendo em conta que os vários ensaios foram realizados com diferentes ângulos de imersão, ϕ , dados pela diferença entre ϕ_{ex} e ϕ_{st} , foi necessário calcular a profundidade axial de corte, e , através da equação (4.2).

$$e = \frac{D}{2}(1 - \cos \phi) \quad (4.2)$$

Para a maquinagem do aço, efetuaram-se ensaios de corte com as várias fresas cilíndricas enunciadas na Tabela 4.1, a 800 rpm com ângulos de entrada do dente a 0° e de saída a 30° , 45° , 60° , 90° e 180° , sucessivamente, com os respetivos valores de e , com profundidade de corte de 1,5 mm e avanço por dente de 0,03 mm. Cada ensaio foi repetido três vezes para estatisticamente se obter valores médios mais adequados. Este procedimento foi repetido para uma velocidade de rotação de 600 rpm, uma profundidade de corte de 2 mm e um avanço por dente de 0,02 mm.

Sabendo que as fresas hemisféricas apresentam uma curvatura no nariz com raio de 5 mm, houve a necessidade de se realizar o ensaio de corte a uma profundidade superior para garantir que toda a aresta de corte do nariz da fresa esta imersa no material. Para estas fresas realizaram-se ensaios a 600 rpm para um ângulo de entrada de 0° e de saída a 26° , 53° , 90° e 60° , a uma profundidade de corte de 6 mm e um avanço por dente de 0,02 mm.

Para a maquinagem do alumínio, o procedimento experimental foi idêntico ao do aço. Efetuaram-se ensaios de corte a 3000 rpm para ângulos de entrada a 0° e saída a 30° , 45° ,

60°, 90° e 180°, com uma profundidade de corte de 2 mm e 2,5 mm e, avanços por dente de 0,07 e 0,05, respectivamente. Nas imersões axiais de 180° os avanços por dente mantiveram o valor de 0,05 mm.

Nas fresas hemisféricas efetuaram-se ensaios de corte a 3000 rpm para ângulos de entrada a 0° e saída a 30°, 45°, 50°, 60° e 180°, com uma profundidade de corte de 6 mm e avanços por dente de 0,02 mm, 0,04 mm e 0,05 mm. Mais uma vez, foram realizadas três aquisições de dados.

Os valores de avanço por dente, profundidade de corte e velocidade de rotação foram decididos de acordo com os catálogos de ferramentas disponibilizados pelos fabricantes. Todos os ensaios e corte foram lubrificados.

A Figura 4.11 (a) ilustra um ensaio de corte do aço e (b), um facejamento com o objetivo de alinhar a face superior do bloco de ensaio após a realização de outros ensaios de corte, de forma a garantir coerência na profundidade de corte durante os ensaios posteriores.

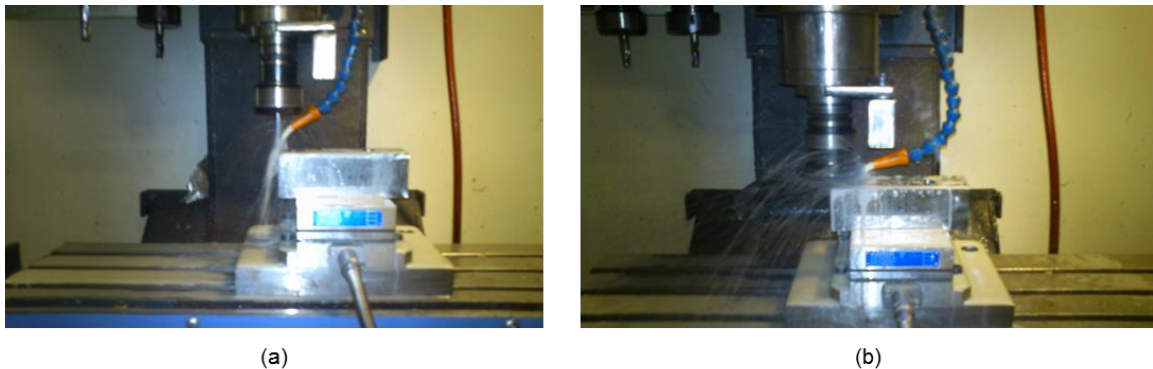


Figura 4.11 – Processos de corte: (a) Fresagem de topo do aço; (b) Facejamento do aço.

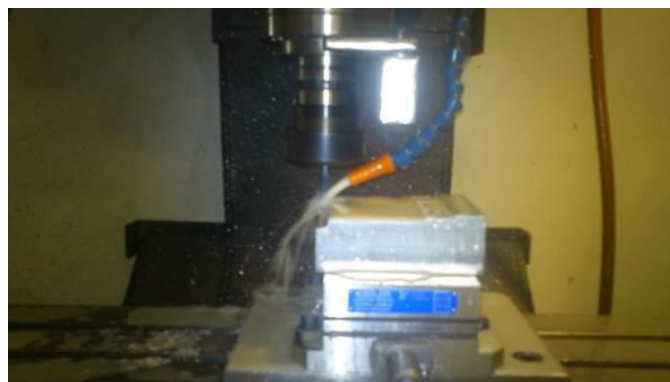


Figura 4.12 – Fresagem de topo com fresa hemisférica do alumínio

A Figura 4.12 mostra o processo de fresagem de topo com fresa hemisférica do alumínio.

4.1.5. Tratamento de dados

O tratamento estatístico dos dados foi realizado utilizando o programa MATLAB. Foram modeladas funções que calculam as forças de corte utilizando o modelo analítico, função *ModelaçãoFresagemHelicoidal.m*, e que analisam as forças obtidas através do processo experimental, função *TrataDados.m*. Os resultados foram obtidos no formato gráfico e as funções poderão ser consultadas em anexo.

Para as forças experimentais, dado que os sinais obtidos contêm sempre um certo ruído, decidiu-se aplicar um filtro para a eliminação desse ruído. Neste caso, selecionou-se um filtro *butterworth* de 5ª ordem passa baixo com frequência correspondente à velocidade de rotação da fresa. Em anexo pode-se consultar a função *filtro.m*.

Para a elaboração dos gráficos das forças de corte simuladas e experimentais dos vários ficheiros criados para cada ensaio, utilizou-se a função *Main_ModelaçãoFresagemHelicoidal.m*, que poderá ser consultada em anexo.

4.2. Resultados experimentais

4.2.1. Aço Ck45

A Figura 4.13 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal sem aplicação do filtro e depois da aplicação do filtro. Foi feito um ensaio com uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 60°, com uma velocidade de rotação de 800 rpm, profundidade de corte de 1,5 mm e avanço por dente de 0,03 mm.

As curvas a azul correspondem ao sinal antes de ser filtrado, onde é visível ruído provocado pelas vibrações decorrentes do funcionamento da ferramenta. No gráfico em baixo, apresentam-se as curvas do sinal filtrado. Observa-se que, tanto as curvas de forças antes de o sinal ser filtrado e após ter sido aplicado o filtro, são semelhantes, pelo que, se demonstra que o filtro escolhido é o adequado.

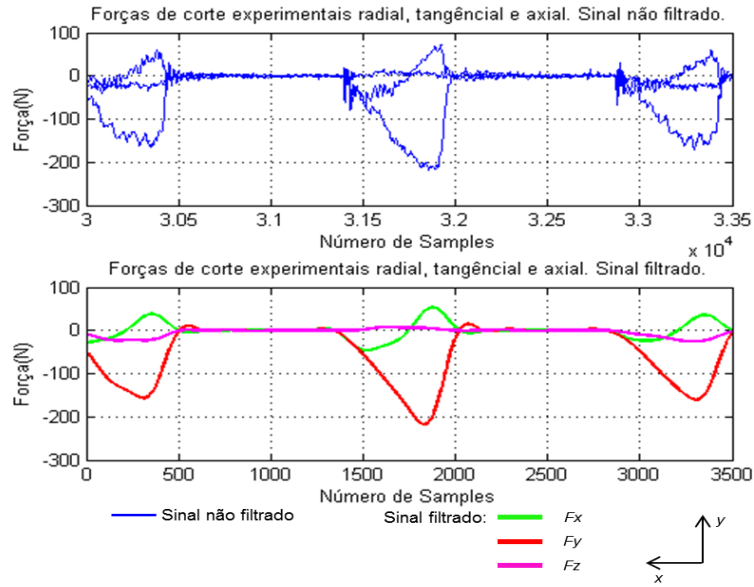


Figura 4.13 – Resultados do ensaio de corte com o Aço Ck45, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

A Figura 4.14 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal sem aplicação do filtro e depois da aplicação do filtro para o ensaio de corte utilizando uma fresa cilíndrica de três dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 60° , com uma velocidade de rotação de 800 rpm, profundidade de corte de 1,5 mm e avanço por dente de 0,03 mm.

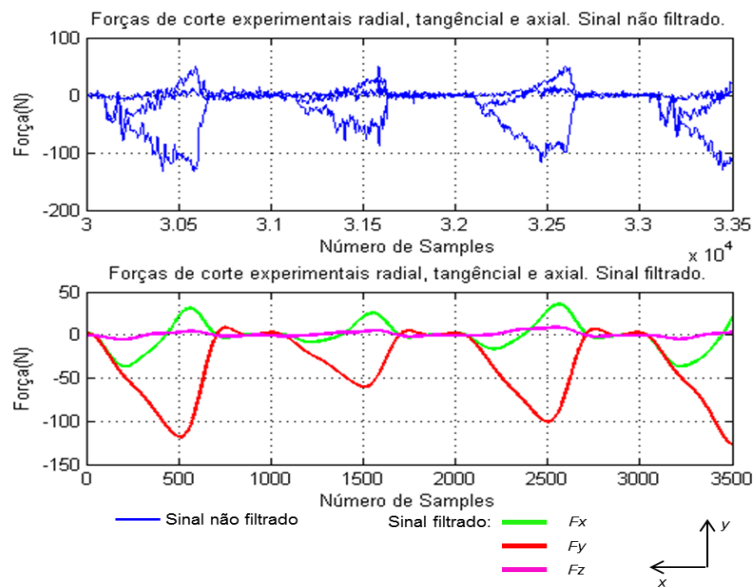


Figura 4.14 – Resultados do ensaio de corte com o Aço Ck45, fresa cilíndrica de três dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

À semelhança do que foi observado para os resultados teóricos, é mostrado nas figuras anteriores que o passo angular é menor na fresa de três dentes comparado com o da fresa de dois dentes, para igual valor de imersão radial.

A Figura 4.15 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal filtradas e não filtradas para o ensaio de corte com uma fresa cilíndrica de quatro dentes, diâmetro 16 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 60° , com uma velocidade de rotação de 800 rpm, profundidade de corte de 1,5 mm e avanço por dente de 0,03 mm.

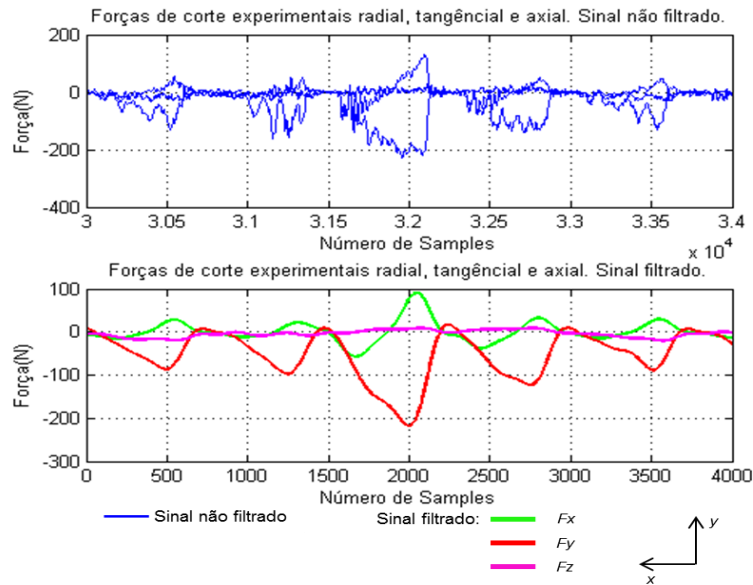


Figura 4.15 – Resultados do ensaio de corte com o Aço Ck45, fresa cilíndrica de quatro dentes, $D=16$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

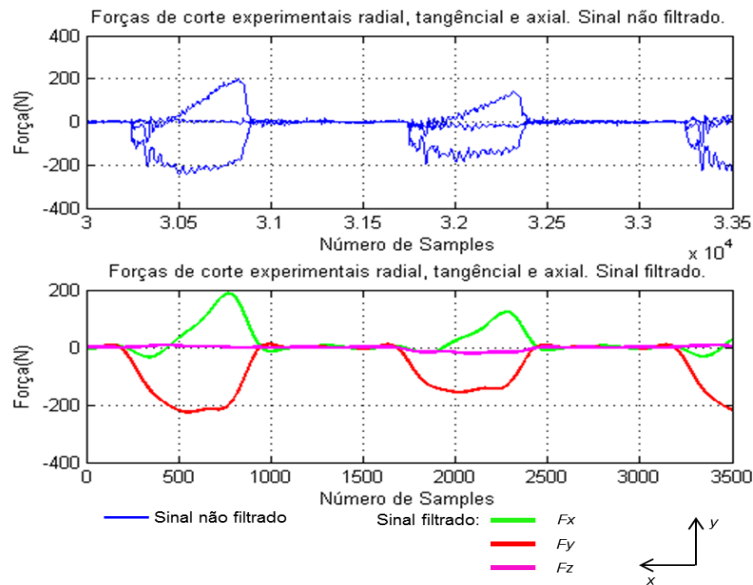


Figura 4.16 – Resultados do ensaio de corte com o Aço Ck45, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

A Figura 4.16 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal filtradas e não filtradas para o ensaio de corte com uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 90° , com uma velocidade de rotação de 800 rpm, profundidade de corte de 1,5 mm e avanço por dente de 0,03 mm.

A Figura 4.17 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal filtradas e não filtradas para o ensaio de corte com uma fresa cilíndrica de três dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 90° , com uma velocidade de rotação de 800 rpm, profundidade de corte de 1,5 mm e avanço por dente de 0,03 mm.

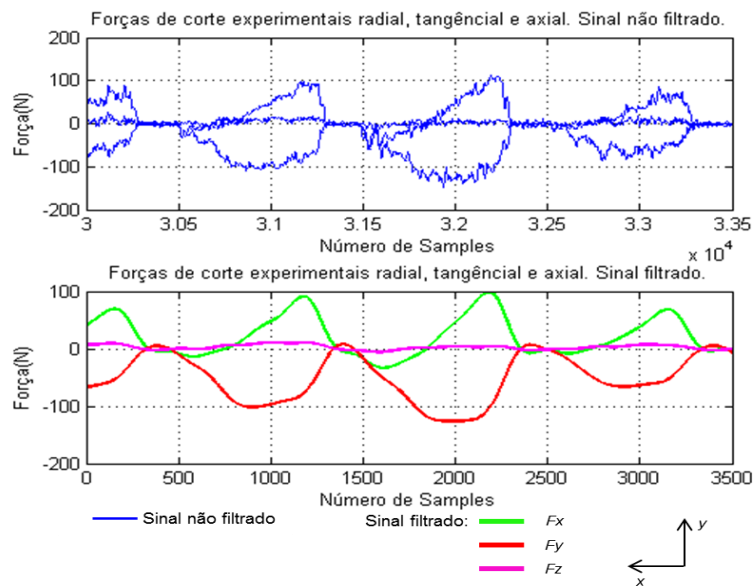


Figura 4.17 – Resultados do ensaio de corte com o Aço Ck45, fresa cilíndrica de três dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

A Figura 4.18 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal sem aplicação do filtro e depois da aplicação do filtro para o ensaio de corte com fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro 12 mm, ângulo de entrada do dente a 0° e saída a 180° , com uma velocidade de rotação 600 rpm, profundidade 1,5 mm e avanço por dente 0,02 mm.

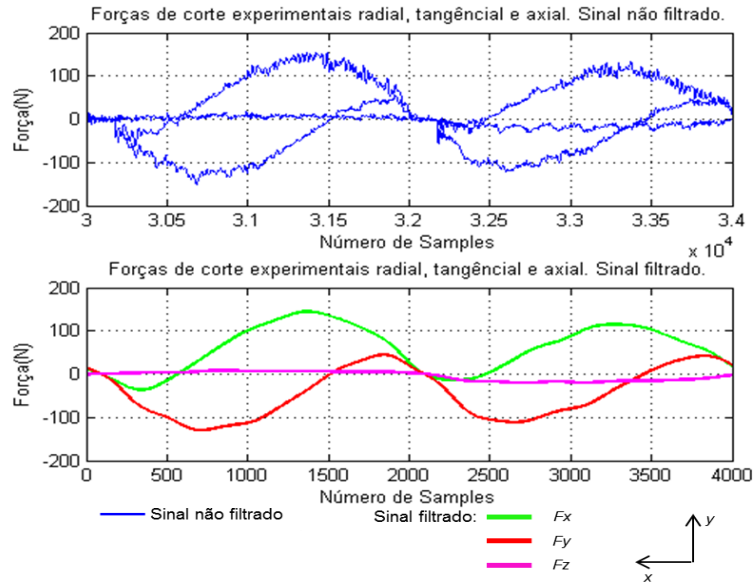


Figura 4.18 – Resultados do ensaio de corte com o Aço CK45, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=180^\circ$, 600 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,02$ mm.

Pela análise da Figura 4.18 verifica-se que, de forma semelhante ao que se observou para as forças teóricas, para uma imersão de 180° de uma fresa de dois dentes, o ponto de saída do dente coincide com o ponto de entrada do dente seguinte.

A Figura 4.19 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal sem aplicação do filtro e depois da aplicação do filtro para o ensaio de corte com uma fresa hemisférica de três dentes, diâmetro de 10 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 53° , com uma velocidade de rotação de 600 rpm, profundidade de corte de 6 mm e avanço por dente de 0,02 mm.

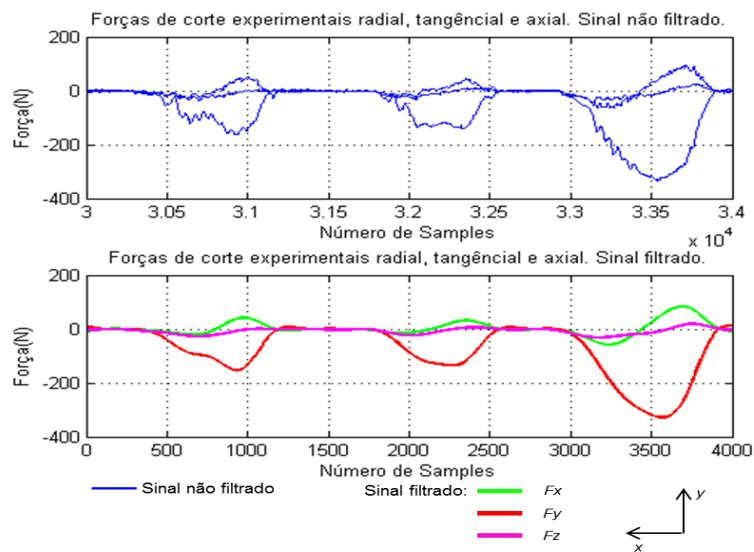


Figura 4.19 – Resultados do ensaio de corte com o Aço Ck45, fresa hemisférica de três dentes, $D=10$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=53^\circ$, 600 rpm, $p=6$ mm e $a_d=0,02$ mm.

4.2.2. Alumínio 7075 – T651

A Figura 4.20 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal filtradas e não filtradas para o ensaio de corte com uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 30° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm, profundidade de corte de 2 mm e avanço por dente de 0,07 mm.

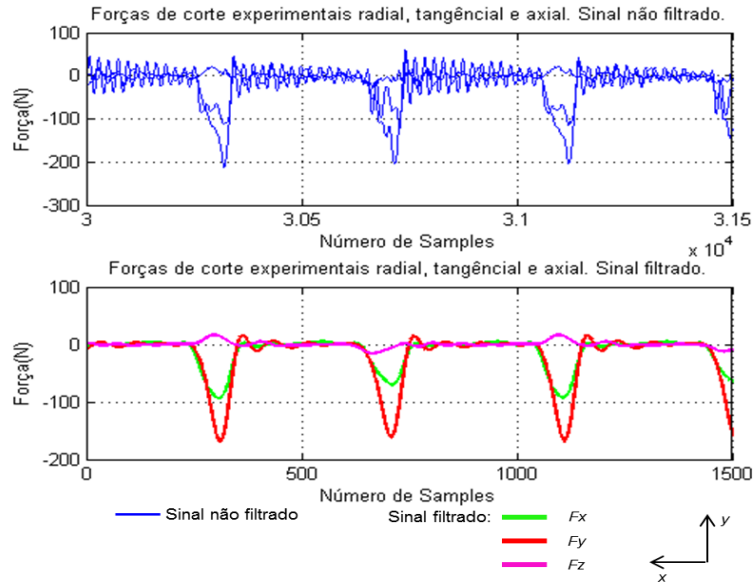


Figura 4.20 – Resultados do ensaio de corte com o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st} 0^\circ$, $\phi_{ex} = 30^\circ$, 3000 rpm, $p=2$ mm e $a_d = 0,07$ mm.

Observa-se na figura anterior que, para os ensaios efetuados utilizando o alumínio, o sinal obtido um sinal com mais ruído comparando com os valores obtidos para o aço Ck45.

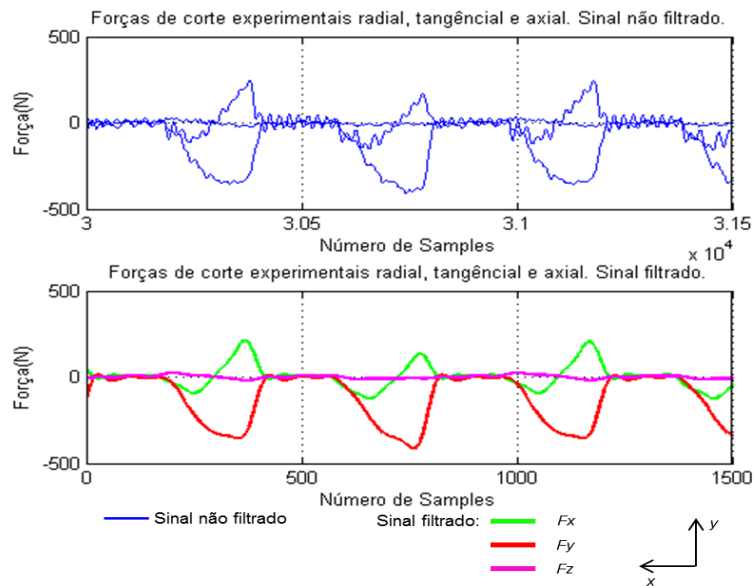


Figura 4.21 – Resultados do ensaio de corte com o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex} = 90^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5$ mm e $a_d = 0,05$ mm.

A Figura 4.21 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal sem aplicação do filtro e depois da aplicação do filtro para o ensaio de corte com uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 90° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm, profundidade de corte de 2,5 mm e avanço por dente de 0,05 mm.

Nos ensaios com o alumínio, o processo de corte foi realizado com velocidades superiores às utilizadas nos ensaios de corte com aço Ck45, por este motivo, a frequência do filtro que foi aplicado ao sinal recebido, foi superior. Observando as figuras anteriores, verifica-se que as curvas antes e após à aplicação do filtro são semelhantes.

A Figura 4.22 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal filtradas e não filtradas para o ensaio de corte com uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 120° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm, profundidade de corte de 2,5 mm e avanço por dente de 0,05 mm.

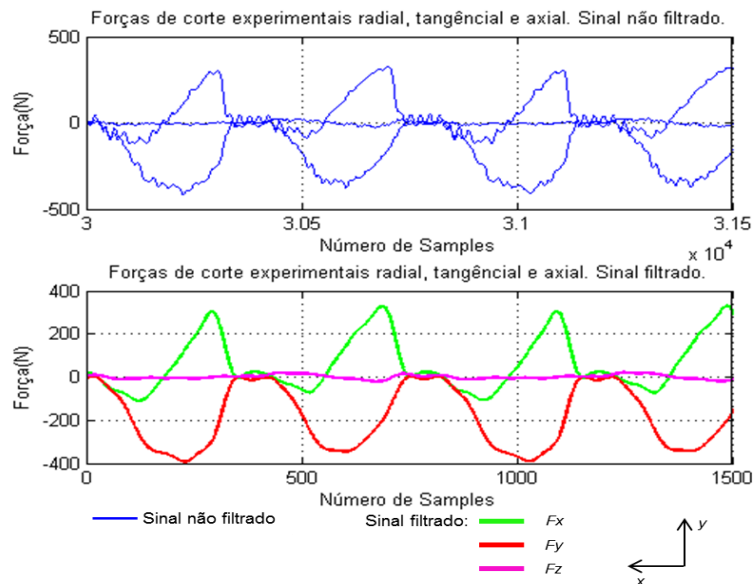


Figura 4.22 – Resultados do ensaio de corte com o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=120^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5$ mm e $a_d=0,05$ mm.

A Figura 4.23 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal sem aplicação do filtro e depois da aplicação do filtro para o ensaio de corte com uma fresa cilíndrica de dois dentes, diâmetro de 12 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 180° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm, profundidade de corte de 2,5 mm e avanço por dente de 0,05 mm.

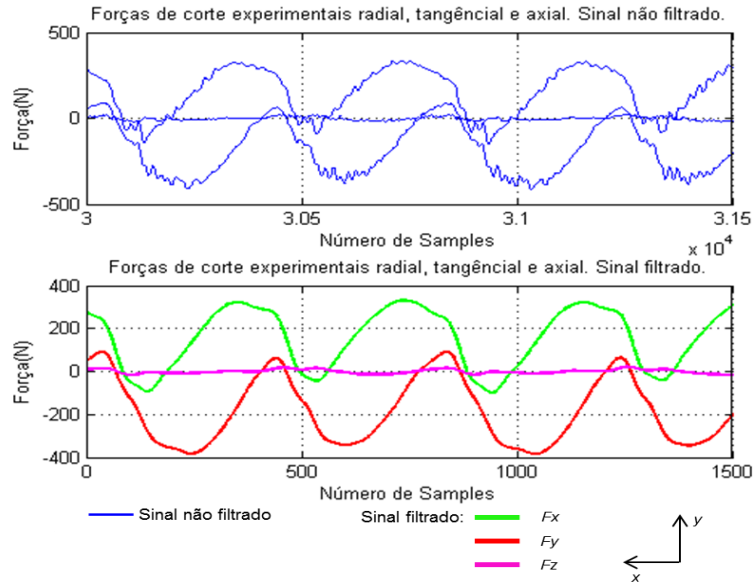


Figura 4.23 – Resultados do ensaio de corte com o Al7075, fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=180^\circ$, 3000 rpm, $p=2,5$ mm e $a_d=0,05$ mm.

A Figura 4.24 apresenta as curvas das forças de corte com fresagem helicoidal sem aplicação do filtro e depois da aplicação do filtro para o ensaio de corte com uma fresa hemisférica de dois dentes, diâmetro de 10 mm, ângulo de entrada do dente de 0° e saída de 30° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm, profundidade de corte de 6 mm e avanço por dente de 0,05 mm.

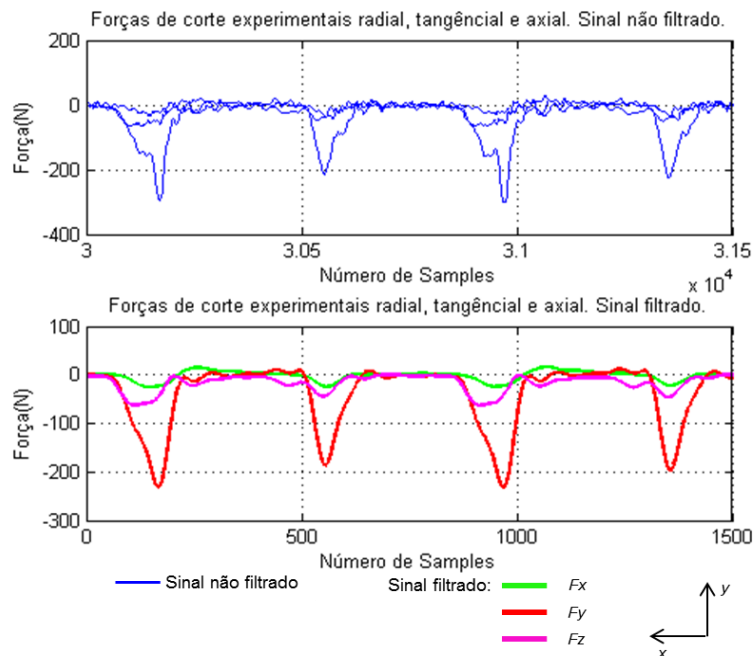


Figura 4.24 – Resultados do ensaio de corte com o Al7075, fresa hemisférica de dois dentes, $D=10$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=30^\circ$, 3000 rpm, $p=6$ mm e $a_d=0,05$ mm.

Tal como como foi observado nos gráficos das forças de corte simuladas, para as fresas hemisféricas, observa-se na figura anterior que as forças de corte obtidas experimentalmente para este tipo de fresas, apresentam valores negativos de acordo com o referencial considerado.

Capítulo 5

Discussão de resultados

Neste capítulo são apresentados e comparados os resultados teóricos e experimentais dos vários ensaios efetuados, quer com o Aço Ck45, quer com o alumínio Al7075 – T651. Todos os ensaios experimentais foram feitos com recurso à lubrificação da peça e da ferramenta, o que leva a uma diminuição do valor das forças de corte, no entanto, a modelação analítica não teve em conta este fator. Este facto poderá dar origem à variação entre os valores das forças de corte modeladas e obtidas experimentalmente, embora se considere que esta variação deverá ser reduzida.

Os resultados apresentados neste capítulo terão a mesma configuração de corte dos resultados apresentados nos capítulos 3 e 4, que foram escolhidos por não se detetarem anomalias na aquisição de dados e por melhor explicarem a coerência do modelo analítico.

Os gráficos ilustrados apresentam as forças de corte obtidas através da modelação analítica, representadas a cores, e as forças de corte obtidas através de experimentação, representadas pela linha negra. Foi feita uma sobreposição dos dois gráficos para se tornar mais clara a análise e comparação dos mesmos.

5.1. Fresas cilíndricas

5.1.1. Aço Ck45

A Figura 5.1 ilustra as forças de corte teóricas e experimentais para o processo de corte realizado com a fresa de diâmetro de 12 mm, dois dentes, com um ângulo de entrada do dente

de 0° e de saída de 60° , com uma velocidade de rotação de 800 rpm a uma profundidade de corte de 1,5 mm e 0,03 mm de avanço por dente.

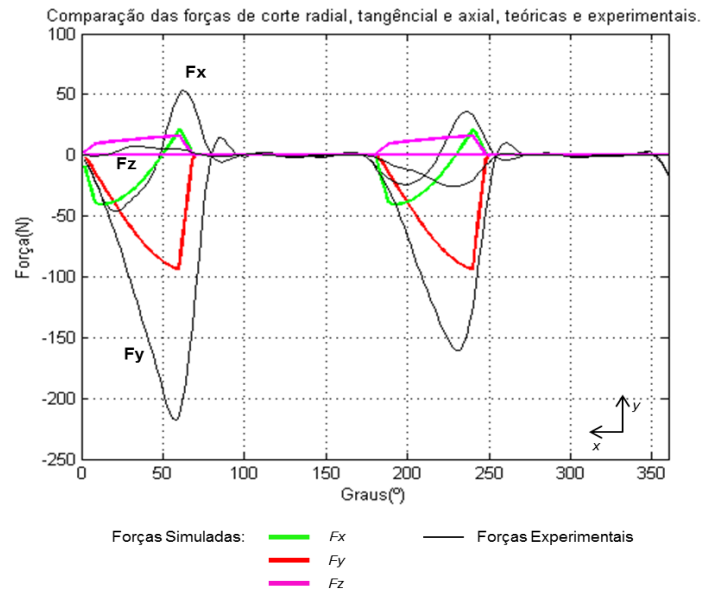


Figura 5.1 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

A Figura 5.2 ilustra as forças de corte teóricas e experimentais para o processo de corte realizado com a fresa de diâmetro de 12 mm, três dentes, com um ângulo de entrada do dente de 0° e de saída de 60° , com uma velocidade de rotação de 800 rpm a uma profundidade de corte de 1,5 mm e 0,03 mm de avanço por dente.

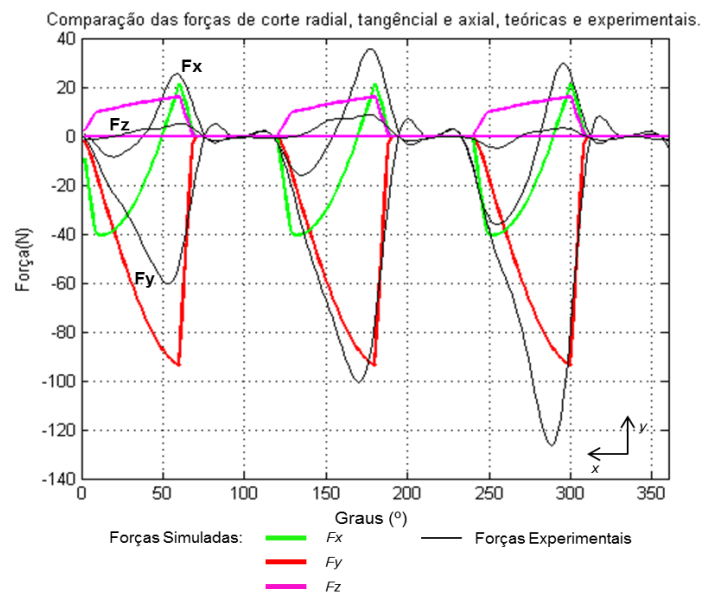


Figura 5.2 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de três dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

Nas Figuras 5.1 e 5.2 é possível observar-se nitidamente a posição dos dentes das fresas identificando-se a imersão correspondente, nestes dois casos de 60° , sendo que na Figura 5.2 observa-se, como era de esperar, um passo entre dentes menor, devido a esta fresa ter mais um dente do que a anterior. Observa-se, também, uma diferença nos valores das forças de corte experimentais, entre os dentes da mesma fresa. Teoricamente, o valor destas forças deveria ser o mesmo. As explicações possíveis desta diferença são a existência de uma excentricidade na fresa ou a fresa ter dentes desiguais.

Tomando o valor médio das forças aplicada por cada dente, verifica-se que no caso da Figura 5.2, existe alguma concordância entre o modelo e as forças medidas. No caso da Figura 5.1 as discrepâncias são maiores. Conforme foi expresso no capítulo 3, a falta de valores dos coeficientes de corte para as características e materiais utilizados, explica a dificuldade de ajustamento dos resultados. No entanto, em termos físicos a forma e o andamento das curvas experimentais representam o mesmo padrão do modelo desenvolvido.

A diferença entre os dentes é da ordem de grandeza dos micrómetros, passando no controlo de qualidade que os fabricantes fazem à produção das mesmas, não tendo implicações na qualidade do acabamento final da peça a ser maquinada. Apesar de estas variações não terem implicação no resultado final da maquinagem são detetadas neste tipo de ensaios experimentais.

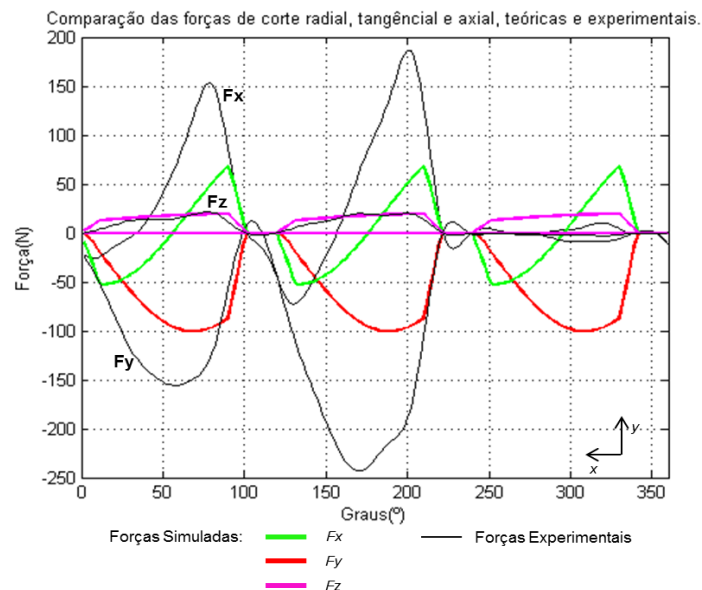


Figura 5.3 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de três dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 600 rpm, $p=2$ mm e $a_d=0,02$ mm.

A Figura 5.3 ilustra o que foi referido nos parágrafos anteriores, uma vez que se pode observar a quase inexistência de forças de corte em um dos três dentes devido ao facto de o dente anterior ser de maior dimensão. Sendo um dente maior do que os restantes, ao passar pela peça remove uma apara com espessura bastante superior ao que deveria remover, removendo

o material na peça e que deveria ser removido pelo dente seguinte originando uma espessura de apra e uma força de corte maior. Consequentemente, devido à anomalia provocada na apra a ser removida, sendo a força de corte bastante superior em zonas pontuais, existe um impacto maior da ferramenta com a peça a maquinar, podendo haver variações resultantes da eventual vibração produzida na ferramenta.

A Figura 5.4 ilustra as forças de corte analíticas e experimentais para o processo de corte realizado com a fresa de diâmetro de 16 mm, quatro dentes, com um ângulo de entrada do dente de 0° e de saída de 60° , com uma velocidade de rotação de 800 rpm a uma profundidade de corte de 1,5 mm e 0,03 mm de avanço por dente.

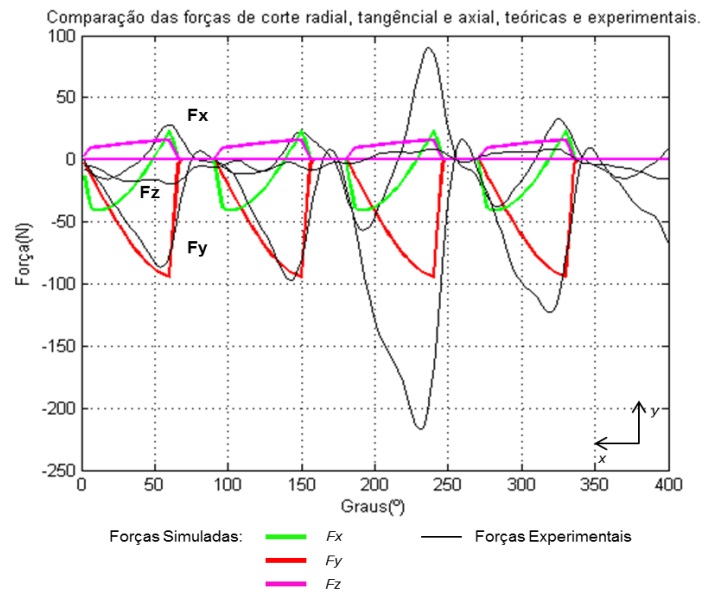


Figura 5.4 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de quatro dentes, $D=16$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=60^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

Pode-se observar nesta última figura a existência de um dente degradado devido ao uso da fresa. Estando a aresta de corte degradada, a força aplicada pelo dente para efetuar a remoção de apra à sua passagem, será maior.

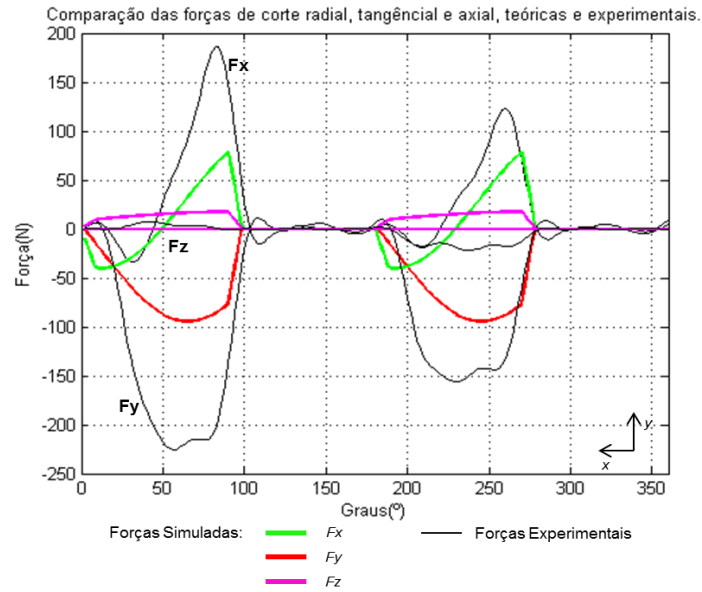


Figura 5.5 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

Na Figura 5.5 são ilustradas as forças de corte teóricas e experimentais para o processo de corte realizado com a fresa de diâmetro de 12 mm, dois dentes, com um ângulo de entrada do dente de 0° e de saída de 90° , com uma velocidade de rotação de 800 rpm a uma profundidade de corte de 1,5 mm e 0,03 mm de avanço por dente.

A Figura 5.6 ilustra as forças de corte teóricas e experimentais para o processo de corte realizado com a fresa de diâmetro de 12 mm, três dentes, com um ângulo de entrada do dente de 0° e de saída de 90° , com uma velocidade de rotação de 800 rpm a uma profundidade de corte de 1,5 mm e 0,03 mm de avanço por dente.

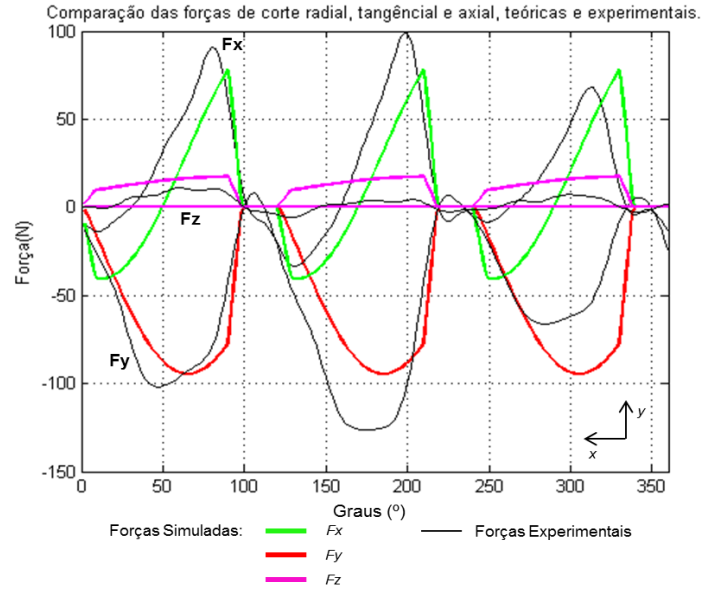


Figura 5.6 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de três dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=90^\circ$, 800 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,03$ mm.

A Figura 5.7 apresenta as forças de corte teóricas e experimentais para o processo de corte realizado com a fresa de diâmetro de 12 mm, dois dentes, com um ângulo de entrada do dente de 0° e de saída de 180° , com uma velocidade de rotação de 600 rpm a uma profundidade de corte de 1,5 mm e 0,02 mm de avanço por dente.

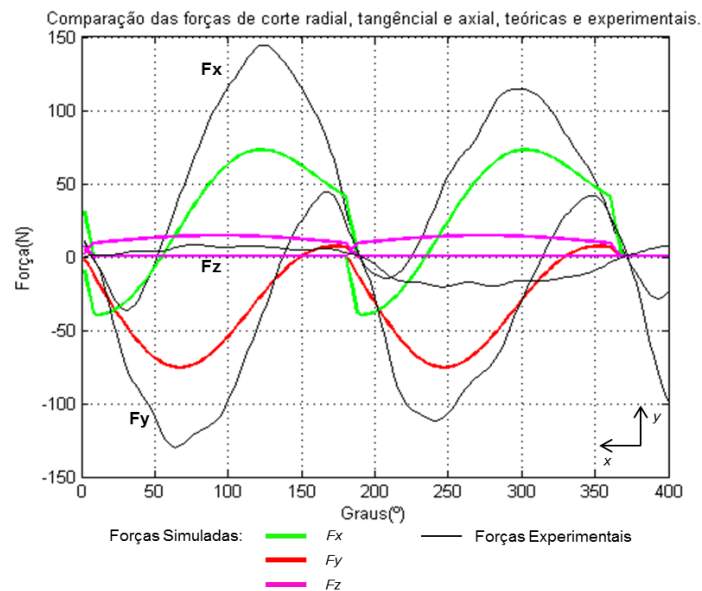


Figura 5.7 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=180^\circ$, 600 rpm, $p=1,5$ mm e $a_d=0,02$ mm.

Analisando as figuras 5.1, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7, observa-se que, tanto as curvas de força teóricas como as experimentais apresentam uma semelhança gráfica, dando solidez à veracidade do modelo analítico a nível físico para as fresas cilíndricas, uma vez que, o comportamento das forças é semelhante. No entanto, observam-se diferenças no que diz respeito aos valores das forças.

Como foi referido no subcapítulo 3.2, que a experimentação e determinação dos coeficientes de corte é um processo demorado e dispendioso, válido para um processo de corte específico, para a ferramenta de corte e material a maquinar. No caso do Aço Ck45 utilizaram-se os coeficientes resultantes da experimentação implementada no documento [5], que embora se considere ser um valor aproximado para a experimentação implementada nesta dissertação, não correspondem ao valor real da mesma. Por outro lado, a experimentação efetuada para a determinação destes valores teve como base o corte ortogonal, que como é sabido, apresenta distribuição de forças apenas em dois planos, tendo em conta unicamente os esforços radiais e tangenciais, negligenciando os esforços axiais. Sabendo que, as referidas constantes de corte funcionam como constantes matemáticas de acerto do modelo, a diferença entre os valores teóricos e experimentais pode ser explicada de acordo com o que foi referido neste parágrafo.

5.1.2. Alumínio Al7075 – T651

A obtenção de resultados credíveis nos ensaios de corte com os blocos de alumínio apresentou alguma dificuldade devido às velocidades de rotação da ferramenta. Tendo em conta o facto de o alumínio ser um material mais macio do que o aço e, sabendo que, o seu ponto de fusão é inferior ao do aço, tornou-se necessário maquinar a uma velocidade mais elevada para se evitar, por um lado, o aparecimento de uma aresta postiça de corte e, por outro lado, o esbeijamento do material.

O centro de maquinagem no qual foi desenvolvido o trabalho experimental desta dissertação apresenta limitações no que diz respeito às velocidades de rotação máximas da ferramenta, 4500 rpm. Através da consulta do documento [23], observa-se que as velocidades mínimas de rotação da ferramenta sugeridas para o corte de alumínio são de 7500 rpm. Desta forma, foi feito um ajuste tanto nas velocidades de rotação, como nas velocidades de avanço de forma a ser possível efetuar os ensaios de corte com o alumínio e a se obter dados das forças de corte credíveis.

Nos ensaios de corte de aparamento no alumínio utilizou-se uma velocidade de rotação da ferramenta de 3000 rpm, velocidade bastante superior à utilizada na maquinagem do aço e, avanços bastante superiores aos utilizados para o aço. Por este facto e, tendo em conta que a frequência e o tempo de aquisição de dados se mantiveram inalterados, a diferença entre valores de forças consecutivos é maior do que nos dados adquiridos na maquinagem do aço.

Este facto revelou ser uma dificuldade na sobreposição dos gráficos experimentais aos gráficos teóricos com a modelação efetuada em MATLAB.

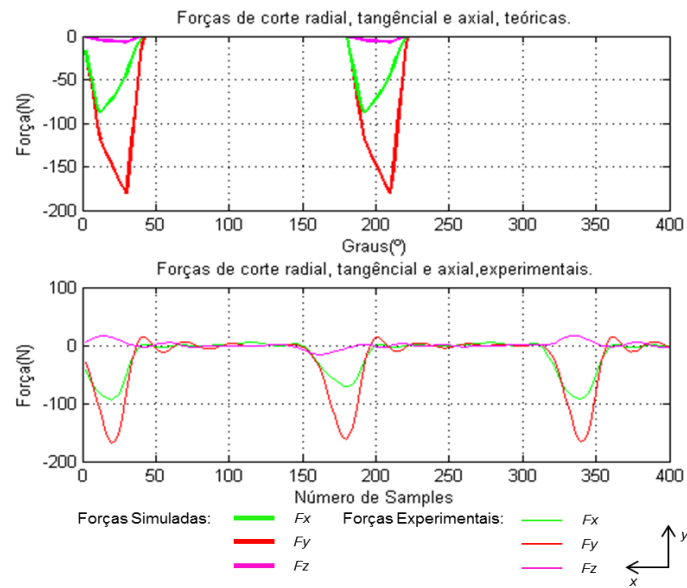


Figura 5.8 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st} = 0^\circ$, $\phi_{ex} = 30^\circ$, 3000 rpm, $p = 2$ mm e $a_d = 0,07$ mm.

A Figura 5.8 apresenta as forças de corte teóricas e experimentais para o processo de corte realizado com a fresa de diâmetro de 12 mm, dois dentes, com um ângulo de entrada do dente de 0° e de saída de 30° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm a uma profundidade de corte de 2 mm e 0,07 mm de avanço por dente.

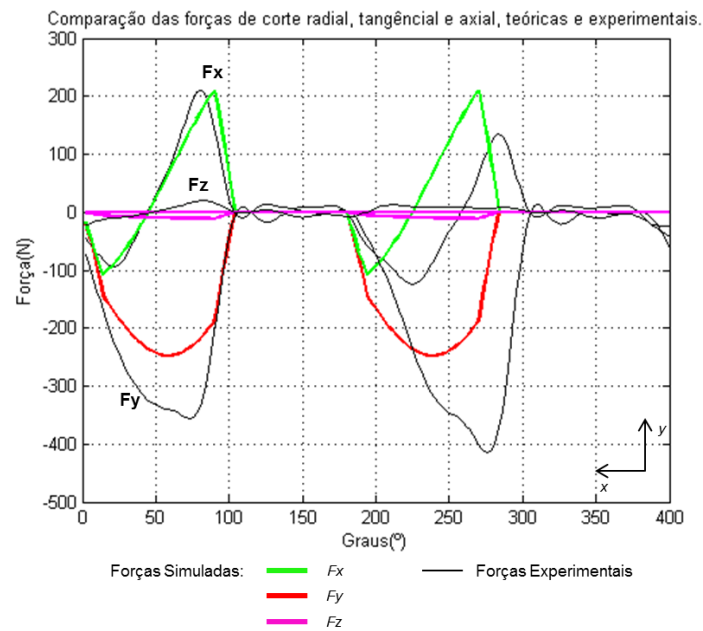


Figura 5.9 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st} = 0^\circ$, $\phi_{ex} = 90^\circ$, 3000 rpm, $p = 2,5$ mm e $a_d = 0,05$ mm.

Na Figura 5.9 são ilustradas as forças de corte teóricas e experimentais para o processo de corte realizado com a fresa de diâmetro de 12 mm, dois dentes, com um ângulo de entrada do dente de 0° e de saída de 90° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm a uma profundidade de corte de 2,5 mm e 0,05 mm de avanço por dente.

A Figura 5.10 apresenta as forças de corte teóricas e experimentais para o processo de corte realizado com a fresa de diâmetro de 12 mm, dois dentes, com um ângulo de entrada do dente de 0° e de saída de 120° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm a uma profundidade de corte de 2 mm e 0,07 mm de avanço por dente.

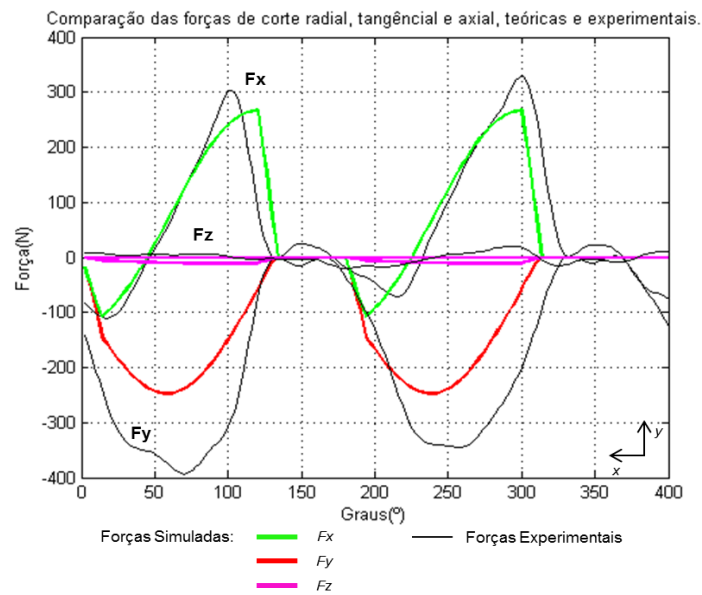


Figura 5.10 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st} = 0^\circ$, $\phi_{ex} = 120^\circ$, 3000 rpm, $p = 2,5$ mm e $a_d = 0,05$ mm.

Na Figura 5.11 são ilustradas as forças de corte teóricas e experimentais para o processo de corte realizado com a fresa de diâmetro de 12 mm, dois dentes, com um ângulo de entrada do dente de 0° e de saída de 180° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm a uma profundidade de corte de 2,5 mm e 0,05 mm de avanço por dente.

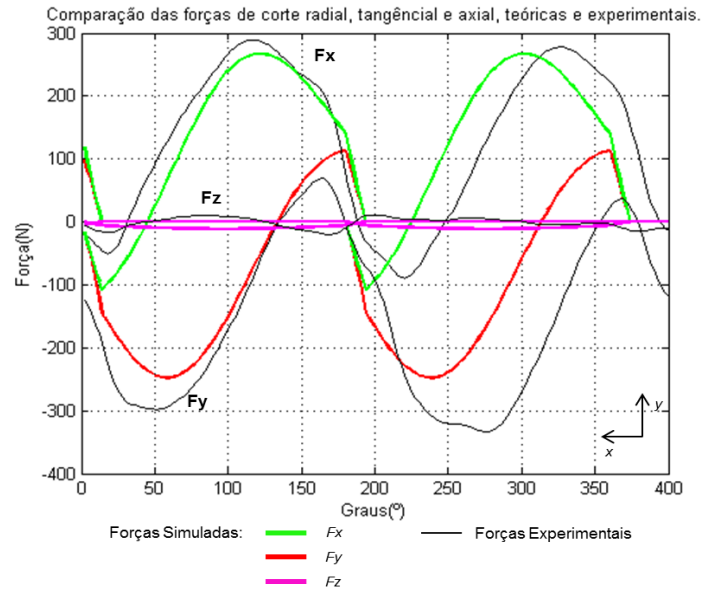


Figura 5.11 – Resultados teóricos e experimentais do corte com fresa cilíndrica de dois dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st} = 0^\circ$, $\phi_{ex} = 180^\circ$, 3000 rpm, $p = 2,5$ mm e $a_d = 0,05$ mm.

Através da análise das Figuras 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11, verifica-se que os resultados do modelo e os resultados experimentais são idênticos graficamente, à semelhança do que aconteceu com o aço, reforçando a veracidade da modelação feita. Desta forma, é também possível verificar que para o alumínio a diferença entre os resultados obtidos através da modelação e os obtidos experimentalmente é menor do que a verificada no aço, explicando-se pelo facto de as constantes de corte para o alumínio terem sido obtidas experimentalmente através de processos de corte ortogonal. No entanto, os coeficientes de corte axiais não foram obtidos experimentalmente pelo facto de o corte ortogonal apenas ter distribuição de forças em dois planos, o que justifica, as diferenças nos valores das forças entre os dois métodos ainda existentes.

5.2.Fresas Hemisféricas

A geometria deste tipo de fresas apresenta raio de ponta de 5 mm, no caso das fresas utilizadas, o que implicou maquinar-se a uma profundidade de corte superior a este valor, aumentando significativamente o binário de corte exigido ao centro de maquinagem. Tendo em conta algumas limitações em termos de potência, os resultados obtidos através de ensaios com fresas hemisféricas possíveis de ser aproveitados, devido ao ruído que o sinal continha, foram mais reduzidos do que na fresagem de topo com fresas cilíndricas. Esta situação limitou a gama de ensaios possíveis de realizar.

Nos ensaios com fresas hemisféricas efetuados no aço, sendo este um material de maior dureza, a profundidade de corte necessária para imersão total da ferramenta, não permitiu a realização de qualquer ensaio neste material, desta forma, em seguida serão apresentadas os resultados referentes ao alumínio.

A Figura 5.12 apresenta as forças de corte teóricas e experimentais para o processo de corte realizado no alumínio com a fresa de diâmetro de 12 mm, três dentes, com um ângulo de entrada do dente de 0° e de saída de 53° , com uma velocidade de rotação de 600 rpm a uma profundidade de corte de 6 mm e 0,02 mm de avanço por dente.

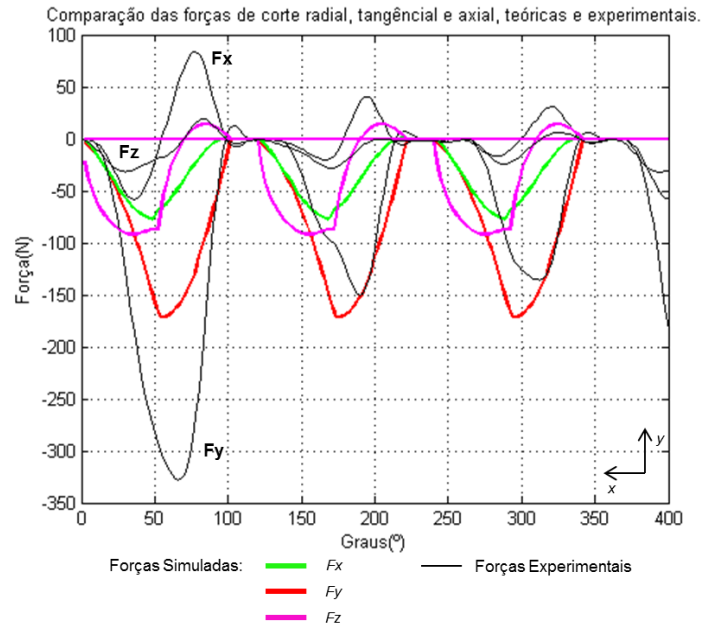


Figura 5.12 – Resultados teóricos e experimentais do corte no aço com fresa hemisférica de três dentes, $D=12$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=53^\circ$, 600 rpm, $p=5$ mm e $a_d=0,02$ mm.

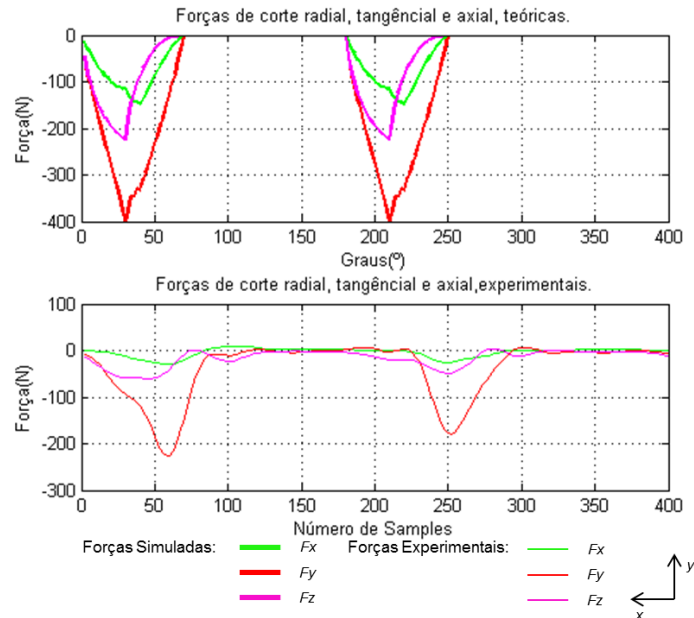


Figura 5.13 – Resultados teóricos e experimentais do corte no alumínio com fresa hemisférica de dois dentes, $D=10$ mm, $\phi_{st}=0^\circ$, $\phi_{ex}=30^\circ$, 3000 rpm, $p=6$ mm e $a_d=0,05$ mm.

Na Figura 5.13 são ilustradas as forças de corte teóricas e experimentais para o processo de corte realizado no alumínio com a fresa de diâmetro de 10 mm, dois dentes, com um ângulo de entrada do dente de 0° e de saída de 30° , com uma velocidade de rotação de 3000 rpm a uma profundidade de corte de 6 mm e 0,05 mm de avanço por dente.

Analisando a Figura 5.12, verifica-se a existência de um dente da fresa com dimensões superiores aos restantes. Verifica-se também diferenças entre a força F_z simulada e obtida através do método experimental, explicada mais uma vez pelos coeficientes de corte utilizados. Em relação às restantes forças verifica-se correspondência entre as curvas simuladas e as reais.

Na Figura 5.13 observa-se, apesar de o sinal ter sido filtrado, a existência de algum ruído que permaneceu no sinal.

Capítulo 6

Conclusões e desenvolvimentos futuros

Conclusões

Deste estudo foi preciso concluir o seguinte:

- O trabalho demonstrou ser possível a utilização de um modelo analítico que permite a determinação das forças de corte para a fresagem em geral, de acordo com a geometria da fresa utilizada (hemisférica, cilíndrica, cónica, com ou sem raio de ponta);
- O modelo analítico desenvolvido afirmou-se ser adequado e capaz de descrever o comportamento real da evolução das forças de corte;
- Os valores das forças do modelo analítico versus resultados experimentais, tiveram desvios que resultam sobretudo de não se terem determinado os coeficientes de corte para os materiais e para as condições de corte utilizadas.

Desenvolvimentos futuros

Nesta dissertação foram apresentadas as constantes de corte para o Aço Ck45, baseadas num estudo efetuado por Gonzalo [5], e do Alumínio Al7075 obtidas pela experimentação em corte ortogonal, utilizando o processo de torneamento. Pela análise do modelo de forças

apresentado e com base nos documentos [4,5,8], é assumido que os coeficientes de corte (K_{ic}) estão relacionados com a deformação plástica do material durante o arranque de aparta efetuado no plano de corte, enquanto os coeficientes de atrito (K_{ie}), estão relacionados com o atrito provocado na aresta de corte durante a deformação da aparta. Os coeficientes de corte obtidos através do processo de corte de torneamento, segundo Gonzalo [5], são idênticos aos da fresagem helicoidal no caso de k_{ic} mas, no caso de k_{ie} , diferem pois estão relacionados com a aresta de corte da ferramenta, com material e com a cinemática do processo. No caso dos coeficientes axiais (k_{ia}) pela análise da formulação efetuada, e não havendo literatura que fundamente o seu significado físico, analisando-os matematicamente, conclui-se que são constantes de calibração do modelo de forças, embora estejam diretamente relacionadas com as forças de corte axiais. A relação dos mesmos com a dureza Brinell do material a maquinar foi admitida nesta dissertação, no entanto permanecem as dúvidas acerca desta especulação.

Seria necessário, para que estes modelos matemáticos pudessem ser utilizados universalmente para cada um dos processos de maquinaria, desenvolver estudos que permitissem, por um lado, uma maior compreensão física destes coeficientes e, por outro lado, seria necessário também padronizar estes coeficientes criando bases de dados, de maneira a que não fosse necessário efetuar trabalho experimental para realizar uma simulação de corte, facto que não é viável na indústria, com recursos de tempo e de material limitados. O desenvolvimento desta temática tem sido âmbito de vários estudos recentes [4,5,8].

O conceito de estabilidade do conjunto máquina-ferramenta é um fator importante a ter em conta. Num caso determinístico, o conceito de estabilidade pode ser definido pelas fronteiras do espaço parametrizado entre o crescimento e o decréscimo das oscilações. Num caso estocástico, o conceito de estabilidade não se encontra bem definido[29]. É demonstrado no documento [29] que certas combinações de ruído e parâmetros de corte que se encontram perto das fronteiras de estabilidade definidas poderão promover a transição entre vários estados de vibração do conjunto peça-ferramenta, o que poderá provocar danos no conjunto e danificar o sinal captado. O cálculo da probabilidade de ocorrência destas transições entre vários estados de vibração poderá potenciar a escolha de parâmetros de corte que evitem a ocorrência de danos materiais e humanos.

A realização de modelos matemáticos que tenham em conta as vibrações do conjunto peça-ferramenta, com o objetivo de identificarem possíveis danos materiais e humanos que possam ocorrer quando definidos os parâmetros de corte, será um importante tema de estudo, beneficiando os modelos matemáticos já existentes, aproximando as simulações de forças de corte à realidade.

Bibliografia

- [1] Wang H., Qin X., Ren C., and Wang Q., 2011, "Prediction of cutting forces in helical milling process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **58**(9-12), pp. 849–859.
- [2] Pamies Teixeira J., 2001, *Fundamentos Físicos do Corte dos Metais*, Lisboa, EDINOVA, ISBN: 972595100-X
- [3] Kulazi A. J., 2007, "COMPORTAMENTO À FADIGA DO AÇO DP600," Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- [4] Gradišek J., Kalveram M., and Weinert K., 2004, "Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **44**(4), pp. 401–414.
- [5] Gonzalo O., Beristain J., Jauregi H., and Sanz C., 2010, "A method for the identification of the specific force coefficients for mechanistic milling simulation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **50**(9), pp. 765–774.
- [6] Bhattacharyya A., 2008, "Predictive force modeling of peripheral milling," pp. 1–194, PhD Thesis, University of Florida.
- [7] Klein W., 1937, "Der zeitliche Verlauf der Umfangskraft bei einem Walzenfräser," *Archive of Applied Mechanics*, *Archive of Applied Mechanics* 13.
- [8] Bhattacharyya A., Schueller J. K., Mann B. P., Ziegert J. C., Schmitz T. L., Taylor F. J., and Fitz-Coy N. G., 2010, "A closed form mechanistic cutting force model for helical peripheral milling of ductile metallic alloys," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **50**(6), pp. 538–551.
- [9] Merchant M. E., 1945, "Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip," *Journal of Applied Physics*, **16**(5), p. 267.
- [10] Piispanen V., 1948, "Theory of Formation of Metal Chips," *Journal of Applied Physics*, **19**(10), p. 876.
- [11] Altintas Y., and Lee P., 1996, "A general mechanics and dynamics model for helical end mills," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **45**, pp. 59–64, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41, Pergamon.
- [12] Altintas Y., 2000, *Manufacturing Automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [13] Engin S., and Altintas Y., 2001, "Mechanics and dynamics of general milling cutters . Part I: helical end mills," **41**, pp. 2195–2212.
- [14] Li X. P., and Li H. Z., 2004, "Theoretical modelling of cutting forces in helical end milling with cutter runout," *International Journal of Mechanical Sciences*, **46**(9), pp. 1399–1414.

-
- [15] Budak E., 2006, "Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46**(12-13), pp. 1478–1488.
- [16] Liu C., Wang G., and Dargusch M. S., 2012, "Modelling, simulation and experimental investigation of cutting forces during helical milling operations," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [17] Salem S., and Bayraktar E., 2012, "Effect of cutting parameters on chip formation in orthogonal cutting," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **50**(1), pp. 7–17.
- [18] Rivière-Lorphèvre E., and Filippi E., 2009, "Mechanistic cutting force model parameters evaluation in milling taking cutter radial runout into account," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **45**(1-2), pp. 8–15.
- [19] Zaghibani I., and Songmene V., 2009, "Estimation of machine-tool dynamic parameters during machining operation through operational modal analysis," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **49**(12-13), pp. 947–957.
- [20] Lutervelt C. Van, and Childs T., 1998, "Present Situation and Future Trends in Modelling of Machining Operations Progress Report of the CIRP Working Group 'Modelling of Machining Operations'," *CIRP Annals* vol. 47/2/1998, **47**.
- [21] Mackerle J., 1998, "Finite-element analysis and simulation of machining: a bibliography (1976–1996)," *Journal of Materials Processing Technology*, **86**, pp. 17–44.
- [22] Lamikiz a., López de Lacalle L. N., Sánchez J. a., and Salgado M. a., 2004, "Cutting force estimation in sculptured surface milling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **44**(14), pp. 1511–1526.
- [23] Vallorbe swiss, 2000, "Cutters in HSS," p. 144, Catálogo técnico.
- [24] Sandvick, 2002, "Ferramentas rotativas," São Paulo, Catálogo técnico.
- [25] Childs J. J., 1973, *Numerical Control Part Programming*, Industrial Press Inc., U.S.
- [26] Azeem A., Feng H.-Y., and Wang L., 2004, "Simplified and efficient calibration of a mechanistic cutting force model for ball-end milling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **44**(2-3), pp. 291–298.
- [27] BUDAK E., ALTINTAS Y., and ARMAREGO E. J. A., "Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data," *Journal of engineering for industry*, **118**(2), pp. 216–224.
- [28] Medina R., 2002, "LabVIEW User Manual," National Instruments Corporation, (320999).
- [29] Buckwar E., Kuske R., L'Esperance B., and Soo T., 2006, "Noise-Sensitivity in Machine Tool Vibrations," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **16**(08), pp. 2407–2416.
-

Anexos

Anexo 1 – ModelaçãoFresagemHelicoidal.m

```
function [Fx,Fy,Fz,Pc,Bc,ang,nrev,dphi] = ModelacaoFresagemHelicoidal;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% INPUTS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%CONDIÇÕES DE CORTE
% omega - Velocidade do dente (rpm)
% p - Profundidade de corte
% fz - Avanço por dente, radial
% phi_st - Angulo de entrada da ferramenta
% phi_ex - Angulo de saída da ferramenta

%FERRAMENTA
% D - diâmetro de ferramenta
% NZ - Número de dentes
% gama - Ângulo de ataque
% beta - Angulo de hélice
% R - raio de curvatura do nariz da ferramenta
% Rr - distância ao eixo do centro do raio de curvatura
% Rz - altura do centro do raio de curvatura

%MATERIAL
% Ktc, Krc, Kac - energias específicas do material
% u - coeficiente de atrito

%ANÁLISE
% N_vol - Intervalo de integração (num. de voltas)
% dz - incremento axial
% phi - Angulo de corte Rotacional/Incremento angular/Ângulo de
imersão
% dphi - incremento angular
% ZL - número de passos em Z para a integração em altura

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OUTPUTS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Forças de corte (historial) - Fx(phi), Fy(phi), Fz(phi)
% Binários de corte e Potências - Bc(phi) e Pc(phi)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% VARIÁVEIS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% psi - angulo de atraso
% h -espessura da apara
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Iniciação das variáveis
[N_volt]=xlsread('variaveis.xlsx','E3:E3');
[nrev]=xlsread('variaveis.xlsx','E4:E4');
[ZL]=xlsread('variaveis.xlsx','E5:E5');
[dphi]=xlsread('variaveis.xlsx','E6:E6');
[D]=xlsread('variaveis.xlsx','E7:E7');
[R]=xlsread('variaveis.xlsx','E8:E8');
[NZ]=xlsread('variaveis.xlsx','E9:E9');
[beta]=xlsread('variaveis.xlsx','E10:E10');
[fz]=xlsread('variaveis.xlsx','E11:E11');
[p]=xlsread('variaveis.xlsx','E12:E12');
[phi_st]=xlsread('variaveis.xlsx','E13:E13');
[phi_ex]=xlsread('variaveis.xlsx','E14:E14');
[Kte]=xlsread('variaveis.xlsx','E15:E15');
[Kre]=xlsread('variaveis.xlsx','E16:E16');
[Kae]=xlsread('variaveis.xlsx','E17:E17');
[Ktc]=xlsread('variaveis.xlsx','E18:E18');
[Krc]=xlsread('variaveis.xlsx','E19:E19');
[Kac]=xlsread('variaveis.xlsx','E20:E20');

%Intervalos de iterações
N_phi=N_volt*2*pi/dphi; %nº passos para a integração angular
(simulação da rotação da ferramenta)
dz=p/ZL; %INCREMENTO PARA A INTEGRAÇÃO EM ALTURA
phi_p=(2*pi)/NZ; % passo angular entre dentes
omega=(2*pi*nrev)/60; % Velocidade angular

Fx=zeros(N_phi,NZ);
Fy=zeros(N_phi,NZ);
Fz=zeros(N_phi,NZ);
Ft=zeros(N_phi,NZ);
Fr=zeros(N_phi,NZ);

%Inicio da integração

for n=1:N_phi %início da integração angular
    phi(n)=phi_st+n*dphi; %ângulo de imersão no fundo da fresa Z=0

    for i=1:NZ %calcula a contribuição dos vários dentes
        phi_1=phi(n)+(i-1)*phi_p; %ângulo de imersão para o dente i
        phi_2=phi_1; %preservar o phi_1
        ang(n)= phi(n)*180/pi; %Para guardar Phi em graus
        for j=1:ZL %integração em altura para cada posição de 1 dente
            Z(j)=j*dz; %posição axial do ponto corrente
            if R~=0 && Z(j)<R
                %condição para estar dentro da zona arredondada quando se está a
                estudar a bullnose
                psi=(Z(j)*tan(beta))/R;
                Rr=(D-2*R)/2; %Estamos na ZONA do BULL NOSE
                r=Rr+sqrt((R^2)-(R-Z(j))^2);
                k=asin((r-Rr)/R);
            else

```

```
%se as duas condições não forem cumpridas então está-se a estudar a
fresa cilíndrica ou já se está acima da zona arredondada
    psi=(2*(Z(j))*tan(beta))/D;
    k=pi/2;
end
phi_2=phi_1-psi; %Para cada altura determina o angulo de
imersão
    if phi_2 <phi_st %Condições para determinar se está fora da
zona de corte
        elseif phi_2>phi_ex && phi_2<(2*pi)+phi_st
            elseif phi_2>phi_ex+(2*pi)
                Fx(n)=0;
                Fy(n)=0;
                Fz(n)=0;
            else
                h=fz*sin(phi_2)*sin(k);
%espessura da apara
                db=dz/sin(k);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      Modelo      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%DETERMINAÇÃO DOS INCREMENTOS DAS FORÇAS
%Cálculo das forças tangencial, radial e axial
    dFt=(Kte+Ktc*h)*db;
    dFr=(Kre+Krc*h)*db;
    dFa=(Kae+Kac*h)*db;

%Transformação das forças para o sistema cartesiano
dFx=-dFr*(sin(phi_2)*sin(k))-dFt*(cos(phi_2))-dFa*(sin(phi_2)*cos(k));
dFy=-dFr*(cos(phi_2)*sin(k))+dFt*(sin(phi_2))-dFa*(cos(phi_2)*cos(k));
dFz=-dFr*(cos(k))-dFa*(sin(k));

%DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS PARA CADA DENTE
    Ft(n,i)=Ft(n,i)+dFt;
    Fr(n,i)=Fr(n,i)+dFr;
    Fx(n,i)=Fx(n,i)+dFx;
    Fy(n,i)=Fy(n,i)+dFy;
    Fz(n,i)=Fz(n,i)+dFz;

    end %passa para o próximo nível em altura
end %passa para o próximo dente

%Determinação das forças resultantes para o angulo de imersão phi_2 e
do binário e potência de corte
    F(n,i)=sqrt((Fx(n,i))^2+(Fy(n,i))^2+(Fz(n,i))^2);
    Bc(n,i)=(D/2)*Ft(n,i);
    Pc(n,i)=Bc(n,i)*omega;

    end %passa ao incremento angular seguinte
end
end
```

Anexo 2 – Tratadados.m

```
function [Fxx,Fyy,Fzz,fx,fy,fz,f] = TrataDados

[f]=xlsread('variaveis.xlsx','I12:I12');
msg=input('Nome do ficheiro:','s');
data=load(msg);
fx=-(data(:,1));
fy=-(data(:,2));
fz=-(data(:,3));
Fxxx=filtro(fx,f);
Fyyy=filtro(fy,f);
Fzzz=filtro(fz,f);
Fxx=Fxxx(30000:40000,1);
Fyy=Fyyy(30000:40000,1);
Fzz=Fzzz(30000:40000,1);

end
```

Anexo 3 – filtro.m

```
function [Y] = filtro(y,f);
clc;
[nrev]=xlsread('variaveis.xlsx','E4:E4');
k=((nrev/60)*2*pi)*2;
wn=f/2;
cutoff=k/wn;

[b,a] = butter(5,cutoff,'low');

Y= filtfilt(b,a,y);
```

Anexo 4 – Main_ModelaçãoFresagemHelicoidal.m

```
% Main Programa Modelação Fresagem Helicoidal
clc
clear all
%Chama a função ModelacaoFresagemHelicoidal

[Fx,Fy,Fz,Pc,Bc,ang,nrev,dphi] = ModelacaoFresagemHelicoidal;

%Chama a Função Tratadados

[Fxx,Fyy,Fzz,fx,fy,fz,f] = TrataDados;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Gráficos Teóricos%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(1);
plot(ang,Fx,'r-','LineWidth',2);
grid on
xlim([0 400]);
hold on
plot(ang,Fy,'g-','LineWidth',2);
```

```
grid on
xlim([0 400]);
hold on
plot(ang,Fz,'m-','LineWidth',2);
grid on
xlabel('Incremento Angular(°)');
ylabel('Força(N)');
title('Forças de corte teóricas radial, tangencial, axial');
xlim([0 400]);
hold off

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Gráficos Experimentais %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(2);
subplot(2,1,1);
plot(fx);
grid on
hold on
plot(fy);
grid on
hold on
plot(fz);
grid on
hold on
xlabel('Número de Samples');
ylabel('Força(N)');
title('Forças de corte experimentais radial, tangencial e axial. Sinal não filtrado.');
```

xlim([30000 31500]);

```
hold off
subplot(2,1,2);
plot(Fxx,'g-','LineWidth',2);
grid on
hold on
plot(Fyy,'r-','LineWidth',2);
grid on
hold on
plot(Fzz,'m-','LineWidth',2);
xlabel('Número de Samples');
ylabel('Força(N)');
title('Forças de corte experimentais radial, tangencial e axial. Sinal filtrado.');
```

xlim([0 1500]);

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Ajuste teórico/Real %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[inc]=xlsread('variaveis.xlsx','I7:I7');
dt=1/f; %tempo de cada sample
omega=(2*pi*nrev)/60;
omegag=(omega*180)/pi; %velocidade angular em graus
tdphi=inc/omegag;
h1=tdphi/dt;
h=round(h1); %parâmetro de ajuste dos gráficos
l=1; %parâmetro de ajuste dos gráficos
b=l*h; %parâmetro de ajuste dos gráficos
```

```

c=( (b)+(270*(h)) )-1;
a=0;
for xi=b:h:c;
a=a+1;
    F_x(a,1)=Fxx(xi,1);
end
a=0;
for yi=b:h:c;
a=a+1;
    F_y(a,1)=Fyy(yi,1);
end
a=0;
for zi=b:h:c;
a=a+1;
    F_z(a,1)=Fzz(zi,1);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Gráficos %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(3);
plot(ang,Fx,'r-','LineWidth',2);
grid on
hold on
plot(ang,F_x,'k-')
plot(ang,Fy,'g-','LineWidth',2);
hold on
plot(ang,F_y,'k-')
hold on
plot(ang,Fz,'m-','LineWidth',2);
hold on
plot(ang,F_z,'k-')
xlabel('Graus(°)');
ylabel('Força(N)');
title('Comparação das forças de corte radial, tangencial e axial,
teóricas e experimentais.');
```



```

xlim([0 400]);

figure(4);
subplot(2,1,1);
plot(ang,Fx,'r-','LineWidth',2);
grid on
hold on
plot(ang,Fy,'g-','LineWidth',2);
hold on
plot(ang,Fz,'m-','LineWidth',2);
xlabel('Graus(°)');
ylabel('Força(N)');
title('Forças de corte radial, tangencial e axial, teóricas.');
```



```

hold off
xlim([0 400]);
subplot(2,1,2);
plot(ang,F_x,'g-')
grid on
hold on
plot(ang,F_y,'r-')
hold on
plot(ang,F_z,'m-')
xlabel('Número de Samples');
ylabel('Força(N)');
```

```
title('Forças de corte radial, tangencial e axial,experimentais.');
```

```
hold off
```

```
xlim([0 400]);
```